



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## OSLNĚNÍ OD SVÍTIDEL S NEUNIFORMNÍ VYZAŘOVACÍ PLOCHOU

DISCOMFORT GLARE OF NON-UNIFORM LUMINAIRES

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Josef Polián

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Škoda, Ph.D.

BRNO 2017

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Josef Polián

**ID:** 158214

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## Oslnění od svítidel s neuniformní vyzařovací plochou

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Literární rešerše
2. Pokusné měření
3. Definování dalšího postupu na základě naměřených dat

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 22.5.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Škoda, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

## **ABSTRAKT**

Umělé osvětlení je nedílnou součástí našeho každodenního života. V dnešní době tráví velké množství lidí v přítomnosti umělé osvětlovací soustavy prakticky celý svůj produktivní čas. To klade značné nároky na hodnocení kvality této umělé osvětlovací soustavy. Jedním z ukazatelů kvality osvětlovací soustavy je vyhodnocení oslnění. Pro hodnocení oslnění se v současnosti používá metodika hodnocení UGR. Hodnocení pomocí UGR má ale svá omezení. Mezi tato omezení patří nejednoznačné hodnocení svítidel s nejednotnou plochou vyzařování (tzv. neuniformní svítidla).

Tato diplomová práce se zabývá problematikou rušivého oslnění od neuniformních typů svítidel. Cílem je provést rešerši této problematiky. První část práce se zaměřuje na teoretické poznatky o oslnění a jeho hodnocení. Další částí práce je provedení rozboru současných studií na téma oslnění od neuniformních typů svítidel. Poslední kapitoly práce se věnují vlastnímu praktickému vyhodnocení oslnění.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

rušivé oslnění; neuniformní svítidla; UGR; jas

## **ABSTRACT**

Artificial lighting is an integral part of our everyday life. Nowadays, a large number of people spend practically all their productive time in the presence of the artificial lighting system. This places considerable demands on the quality of this artificial lighting system. One of the indicators of the quality of the lighting system is the evaluation of glare. The UGR evaluation methodology is currently used to evaluate glare. However, the UGR rating has its limitations. These limitations include ambiguous assessments of luminaires with non-uniform luminous surface (so-called non-uniform luminaires).

This diploma thesis deals with the issue of discomfort glare of non-uniform luminaires. The aim is to make a literature review of this issue. The first part focuses on theoretical knowledge of glare and its evaluation. Another part is an analysis of recent studies on the topic about glare from non-uniform types of luminaires. The last chapters of the thesis deal with own practical evaluation of glare.

## **KEY WORDS**

discomfort glare; non-uniform luminaires; UGR; luminance

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:**

POLIÁN, J. *Oslnění od svítidel s neuniformní vyzařovací plochou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 73 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Škoda, Ph.D.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Oslnění od svítidel s neuniformní vyzařovací plochou jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Škodovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Vyrtych za dodání testovaných svítidel a společnosti DNA za zapůjčení zařízení potřebných pro pokusné měření. Také bych zde rád poděkoval mé přítelkyni Vendule Rozmanové za velkou podporu při studiu a tvorbě této diplomové práce.

V Brně dne .....

.....

podpis autora

## OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK .....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD.....	12
1.1 CÍLE PRÁCE .....	12
2 OSLNĚNÍ.....	13
2.1 TŘÍDĚNÍ OSLNĚNÍ.....	13
2.2 HODNOCENÍ OSLNĚNÍ .....	14
2.2.1 HODNOTÍCÍ STUPNICE UGR.....	17
2.3 OMEZENÍ SYSTÉMU HODNOCENÍ OSLNĚNÍ UGR.....	18
2.3.1 ROZŠÍŘENÍ UGR – PRO MALÉ ZDROJE .....	18
3 MĚŘENÍ RUŠIVÉHO OSLNĚNÍ .....	20
3.1 SUBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ .....	20
3.1.1 VLIVY NA HODNOCENÍ RUŠIVÉHO OSLNĚNÍ.....	21
3.2 OBJEKTIVNÍ MĚŘENÍ.....	22
4 NEUNIFORMNÍ ZDROJE OSLNĚNÍ .....	24
4.1 NEUNIFORMITA .....	24
4.2 VLIV KONTRASTU JASU NA UNIFORMITU.....	25
4.3 VLIV POČTU A ROZMĚRU LED.....	25
4.4 VLIV VZDÁLENOSTI MEZI LED .....	26
4.5 VLIV POZOROVACÍHO ÚHLU.....	26
4.6 VLIV JASU POZADÍ.....	26
5 HODNOCENÍ RUŠIVÉHO OSLNĚNÍ OD NEUNIFORMNÍCH ZDROJŮ OSLNĚNÍ.....	27
5.1 UGR PRO NEUNIFORMNÍ ZDROJE OSLNĚNÍ.....	27
5.2 RUŠIVÉ OSLNĚNÍ ZPŮSOBENÉ LED SVÍTIDLEM .....	30
5.3 KOMPLEXNÍ VZTAH PRO VÝPOČET RUŠIVÉHO OSLNĚNÍ .....	32
5.4 DALŠÍ ZÁVĚRY STUDIÍ NA RUŠIVÉ OSLNĚNÍ OD NEUNIFORMNÍHO SVÍTIDLA .....	34
5.5 JASOVÁ ANALÝZA.....	37
5.5.1 VÝPOČET UGR ZALOŽENÝ NA JASOVÉ MAPĚ PRO UNIFORMNÍ A NEUNIFORMNÍ TYP SVÍTIDLA .....	37
5.5.2 ALTERNATIVNÍ VÝPOČET UGR .....	39
6 MODELOVÉ SIMULACE OSLNĚNÍ.....	42
6.1 VLIV KONTRASTU JASU.....	42
6.2 POMĚR PLOCHY VYZAŘOVÁNÍ SVÍTIDLA.....	45

---

<b>7 POKUSNÉ MĚŘENÍ .....</b>	<b>49</b>
<b>7.1 MÍSTNOST MĚŘENÍ A TESTOVANÁ SVÍTIDLA .....</b>	<b>49</b>
<b>7.2 SIMULACE EXPERIMENTU .....</b>	<b>51</b>
7.2.1 ZHODNOCENÍ SIMULACE EXPERIMENTU .....	52
<b>7.3 JASOVÁ ANALÝZA .....</b>	<b>52</b>
7.3.1 PŘÍPRAVA A POSTUP MĚŘENÍ .....	52
7.3.2 ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT .....	53
7.3.3 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT SE SIMULACÍ .....	55
7.3.4 VLIV VÝBĚRU PLOCHY VYZAŘOVÁNÍ .....	57
<b>7.4 ZHODNOCENÍ POKUSNÉHO MĚŘENÍ A DEFINOVÁNÍ DALŠÍHO POSTUPU .....</b>	<b>59</b>
<b>8 ZÁVĚR .....</b>	<b>60</b>
<b>8.1 NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU .....</b>	<b>60</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>61</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>63</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1: Nomogram Luckieshe a Gutha pro stanovení činitele polohy <math>p</math> v závislosti na umístění oslňujícího zdroje vůči ose pohledu (převzato z literatury [1]).</i>	15
<i>Obr. 2-2: Geometrické uspořádání oslňujícího zdroje a oka pozorovatele (převzato a modifikováno z literatury [1]).</i>	15
<i>Obr. 2-3: Znázornění parametrů pro UGR (modifikováno z literatury [9]).</i>	18
<i>Obr. 3-1 Kruithofův diagram (modifikováno z <a href="https://goo.gl/UGPk5U">https://goo.gl/UGPk5U</a>).</i>	22
<i>Obr. 4-1: Parametry svítidla, které ovlivňují vnímání oslnění a mají vliv na uniformitu svítidla (převzato a upraveno z literatury [15]).</i>	25
<i>Obr. 5-1: Struktura laboratoře (upraveno z literatury [16]).</i>	28
<i>Obr. 5-2: Jednotlivé použité zdroje oslnění (převzato a upraveno z literatury [16]).</i>	28
<i>Obr. 5-3: Schematické znázornění rozmístění prvků při měření (převzato z [17]).</i>	30
<i>Obr. 5-4: Konfigurace LED v matici druhého vzoru rozložení (modifikováno z [17]).</i>	31
<i>Obr. 5-5: Konfigurace LED v matici prvního vzoru rozložení (převzato z [17]).</i>	31
<i>Obr. 5-6: Rozložení místnosti experimentu. Rozměry jsou uvedeny v metrech (upraveno z [18]).</i>	33
<i>Obr. 5-7: Plocha vyzařování použitých svítidel (upraveno z [23]).</i>	36
<i>Obr. 5-8: Jasový obraz a detail jasové mapy (převzato a upraveno z [7]).</i>	38
<i>Obr. 5-9: Principiální znázornění uniformní aproximace svítidla (převzato a upraveno z [27]).</i>	40
<i>Obr. 5-10: Vliv výběru hranice jasu na hodnotu UGR (převzato a upraveno z [27]).</i>	41
<i>Obr. 6-1: Schematické znázornění rozměrů místnosti a rozmístění daných prvků, při prováděných simulací (rozměry jsou uvedeny v metrech).</i>	42
<i>Obr. 6-2: Rozdělení plochy vyzařování svítidla <math>L_1</math> při simulaci jednotnosti jasu.</i>	43
<i>Obr. 6-3: Grafická závislost <math>\Delta UGR_{AVG}</math> na hodnotě kontrastu <math>K_1</math>.</i>	44
<i>Obr. 6-4: Rozložení elementárních vyzařovacích ploch svítidla <math>L_1</math>.</i>	45
<i>Obr. 6-5: Závislost hodnoty UGR na světelném toku pro různé poměry plochy vyzařování.</i>	47
<i>Obr. 7-1: Rozmístění testovaných svítidel spolu s body ve kterých se oslnění vyhodnocuje.</i>	49
<i>Obr. 7-2: Grafické uživatelské rozhraní pro ovládání svítidel.</i>	51
<i>Obr. 7-3: HDR snímek pro pozici P3 a svítidlo S4 (vlevo) a jasová mapa detailního snímku svítidla S4 (vpravo).</i>	54
<i>Obr. 7-4: Průběhy z měření svítidla pomocí rychlého fotočlánku.</i>	56
<i>Obr. 7-5: Hodnota UGR z měření a simulace pro různé uvažování výběru plochy vyzařování pro jednotlivá místa pozorovatele.</i>	58

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1: Koeficienty pro výpočet činitele oslnění [1]</i> .....	14
<i>Tab. 2-2: Stupně vnímání rušivého oslnění v závislosti na hodnotě UGR [7].</i> .....	17
<i>Tab. 2-3: Mezní hodnoty činitele oslnění UGR [2]</i> .....	18
<i>Tab. 5-1: Průměrný jas a poměr minimálního a maximálního jasu pro každé svítidlo [16]</i> .....	29
<i>Tab. 5-2: Hodnoty veličin použitých pro výpočet UGR v hlavním experimentu [16]</i> .....	29
<i>Tab. 5-3: Poměr intenzity mezi vnitřním a vnějším kruhem tvořeným LED [17].</i> .....	31
<i>Tab. 5-4: Úrovně osvětlenosti a uniformity [18].</i> .....	33
<i>Tab. 5-5: Maximum, minimum a rozsah hodnot UGR při použití různých algoritmů seskupování pixelů [7].</i> .....	39
<i>Tab. 5-6: UGR získané z jasové mapy, výpočtem doporučeným CIE a modifikací pro malé zdroje oslnění [7].</i> .....	39
<i>Tab. 6-1: Hodnoty kontrastu jasu použitých při prováděné simulaci.</i> .....	43
<i>Tab. 6-2: Hodnota UGR pro vyhodnocované pozice pozorovatele a jednotlivé kroky simulace...</i>	43
<i>Tab. 6-3: Odchylka hodnoty <math>\Delta UGR</math> pro vyhodnocované pozorovatele a jednotlivé kroky simulace, spolu s uvedením průměrné odchylky <math>\Delta UGR_{AVG}</math>.</i> .....	44
<i>Tab. 6-4: Hodnoty UGR pro poměr plochy vyzařování a danou hodnotu jasu.</i> .....	46
<i>Tab. 6-5: Parametr <math>b</math> pro daný poměr plochy vyzařování.</i> .....	47
<i>Tab. 7-1: Velikost a rastr plochy vyzařování použitých svítidel při pokusném měření.</i> .....	50
<i>Tab. 7-2: Parametry společné pro všechna použitá svítidla.</i> .....	50
<i>Tab. 7-3: Naměřené a vypočtené hodnoty pro výpočet oslnění podle UGR.</i> .....	55
<i>Tab. 7-4: Legenda k tab. 7-5 a obr. 7-4 pro jednotlivé hodnoty UGR.</i> .....	57
<i>Tab. 7-5: Hodnota UGR z měření a simulace pro různé uvažování výběru plochy vyzařování. ...</i>	57
<i>Tab. 7-6: Vliv mezního jasu pro výběr svítící plochy na hodnotu UGR</i> .....	58

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$G$	-	Činitel oslnění
$p$	-	Činitel polohy
$L$	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$	Jas
$L_z$	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$	Jas zdroje oslnění
$L_p$	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$	Jas pozadí
$L_{\text{avg}}$	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$	Průměrný jas
$a, b, c, d$	-	Koeficienty pro výpočet činitele oslnění
$a, h, l$	m	Vzdálenosti
$\Omega$	sr	Prostorový úhel
$GI_s$	-	Sorensenův vztah
CIE		Mezinárodní komise pro osvětlování
UGR	-	Jednotný systém hodnocení oslnění
$E$	lx	Osvětlenost
$E_{nv}$	lx	Nepřímá vertikální osvětlenost
$r$	m	Vzdálenost
$r$	-	Korelační koeficient
$\theta$	°	Úhel mezi svítidlem a směrem pohledu
$A$	$\text{m}^2$	Plocha
$I$	cd	Svítivost
$\text{UGR}_{\text{small}}$	-	Rozšíření metodiky UGR
LED	-	Dioda emitující světlo
$T_c$	K	Teplota chromatičnosti
$T_e$	K	Ekvivalentní teplota chromatičnosti
$\check{S}$	m	Šířka
$D$	m	Délka
$V$	m	Výška
$z$	-	Uniformita svítidla
<i>váha</i>	-	Váhový faktor
$U$	-	Uniformita
BCD	-	Hranice mezi přijatelným a nepříjemným oslněním
$K$	-	Kontrast jasu
$P$	-	Pozice pozorovatele
$A_r$	$\text{m}^2$	Plocha vyzařování svítidla
$\Phi$	lm	Světelný tok
$R_a$	-	Index podání barev
RAW	-	Formát obsahující nezpracované informace ze snímače fotoaparátu
$L_{z50\text{mm}}$	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$	Průměrný jas zdroje oslnění nasnímaný normálním objektivem
$L_{z\text{FishEye}}$	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$	Průměrný jas zdroje oslnění nasnímaný širokoúhlým objektivem

# 1 ÚVOD

Světelná technika patří neodmyslitelně k životu člověka, kdy člověk přijímá většinu okolních informací pomocí zraku. Je proto nutné dodržet správný návrh osvětlovacích soustav tak, aby toto osvětlení vytvářelo zrakovou pohodu, tzn. dosažení příjemného a příznivého psychofyzilogického stavu organismu. Hodnocení oslnění je jedním z parametrů důležitých pro dodržení zrakové pohody a zrakového výkonu osoby, která se vyskytuje v prostoru s umělou osvětlovací soustavou. Pro hodnocení oslnění je všeobecně doporučována metoda hodnocení oslnění pomocí UGR.

Hodnocení pomocí UGR má určitá omezení a v současnosti se na odstranění těchto omezení soustředí mnoho studií. Mezi tato omezení patří nejednoznačné hodnocení oslnění pomocí UGR při hodnocení neuniformního zdroje oslnění. Neuniformní zdroje oslnění jsou charakterizovány nejednotným rozložením jasu na povrchu vyzařování, kdy dochází k velkým kontrastům jasu v rámci svítidla. Na svítících plochách těchto svítidel se mohou vyskytovat lokální špičky o vysoké hodnotě jasu, což je typické například pro některé LED svítidla. Toto omezení se dostalo do popředí zájmu při uvedení LED svítidel pro široké použití v osvětlování.

První část práce bude zaměřena na samotný jev oslnění, kde bude tato problematika teoreticky popsána. Dále se práce bude zabývat hodnocením oslnění a omezeními UGR.

Hlavní část práce bude zaměřena na hodnocení oslnění neuniformních světelných zdrojů oslnění. Teoreticky zde budou popsány vlivy na uniformitu svítidel a následně bude provedena literární rešerše jednotlivých studií zaměřených na hodnocení oslnění od neuniformních typů těchto oslňujících zdrojů. Jelikož řešená problematika nemá v současnosti jasně stanovenou metodu řešení, bude rešerše důležitá pro stanovení současných přístupů jednotlivých studií k řešené problematice.

Praktická část práce bude zaměřena na vlastní vyhodnocení rušivého oslnění od neuniformního typu svítidla.

## 1.1 Cíle práce

Cílem této diplomové práce je provést literární rešerši současných studií na zvolené téma. Další cíle práce jsou provedení počátečního měření na vybraných typech svítidel s neuniformní vyzařovací plochou a stanovení výsledných závěrů z provedeného měření.

## 2 OSLNĚNÍ

Oslnění je nepříznivý stav, při kterém je negativně ovlivněna činnost zrakového systému. Oslnění vzniká, jestliže se v zorném poli oka vyskytují příliš velké jasy nebo jejich rozdíly, popřípadě vzniknou-li velké prostorové či časové kontrasty jasů, které výrazně překračují meze adaptability zraku. K oslnění tedy dochází, je-li sítnice nebo její část vystavena jasů vyššímu, než na který je oko adaptováno [1,2].

### 2.1 Třídění oslnění

Oslnění může být rozlišováno podle příčiny jako oslnění přímé, způsobené nadměrným jasnem svítících částí svítidel nebo hlavních povrchů prostoru (např. stropu a stěn při nepřímém osvětlení). Odrazy svítících ploch na lesklých částech pozorovaných předmětů a jejich bezprostředního okolí způsobují oslnění odrazem. Při náhlé změně adaptačního jasu, které se zrakový systém nestačí tak rychle přizpůsobit, dochází k oslnění přechodovému. Dalším případem je oslnění závojové, které vzniká, je-li před pozorovaným pozadím prostředí s vyšším jasnem (např. při mlze před světlomety automobilu).

Z hlediska světelné techniky je nejdůležitější oslnění kontrastem. Toto oslnění vzniká, vyskytnou-li se v zorném poli jasy příliš vysoké v porovnání s jasnem, na který je zrak adaptován. Toto oslnění je v osvětlovacích soustavách nejčastější.

Základní rozlišení oslnění potom vychází z psychofyzilogických následků na stav zrakového systému a člení se na oslnění:

1. psychologické
  - pozorovatelné
  - rušivé
2. fyziologické
  - omezující
  - oslepující

Fyziologické omezující oslnění zhoršuje činnost zraku, neboť se prokazatelně snižuje zraková ostrost a kontrastní citlivost. Omezující oslnění je tedy objektivně zjiitelné měřením změn zrakových funkcí. Mezi fyziologické oslnění patří i oslnění oslepující, což je mezní případ, označený též jako absolutní oslnění, které úplně znemožňuje zrakovou činnost.

Jelikož v osvětlovacích soustavách se fyziologické oslnění prakticky nesmí objevit, je předmětem hodnocení oslnění především psychologické rušivé oslnění. Při psychologickém oslnění oslnující zdroj v zorném poli odpoutává pozornost pozorovatele od vlastního zrakového úkolu, vzniká subjektivní pocit zrakové nepohody a nadměrně vzrůstá únava, aniž by si pozorovatel uvědomoval, že je to způsobeno oslněním. Měřitelné změny zrakových funkcí, jako je zraková ostrost nebo kontrastní citlivost, však psychologické oslnění nevyvolává a měření psychologického oslnění je tedy velice nesnadná záležitost [1,2].

## 2.2 Hodnocení oslnění

Hodnocení oslnění v interiérech se vesměs zaměřuje na přímé oslnění a je založeno na výsledcích výzkumu rušivého oslnění. Jelikož chybí teoretické pochopení přesné příčiny vzniku oslnění, vychází se pouze z poznatků, že oslnění je vyvoláváno oslňujícími zdroji, umístěnými v zorném poli pozorovatele tak, že u něj vyvolají vědomé narušení zrakové činnosti. V podstatě všechny metody hodnocení oslnění z toho faktu vycházejí a jsou založeny na podobných experimentech. Rušivé oslnění se tedy vyšetřuje statistickým zpracováním výsledků pozorování a hodnocení situace při nejružnějších činnostech většího počtu pozorovatelů v modelových laboratorních prostorech. Na základě těchto experimentů a statistických pozorování vznikly empirické vztahy a byly definovány tabulky hodnot, kde se mohou hodnoty oslnění vypočtené těmito vztahy pohybovat, aby vyhodnocovaná soustava odpovídala danému standardu.

Jedním z těchto empirických vztahů, kterým se kvantifikuje míra oslnění je činitel oslnění. Určení tohoto vztahu vychází z úvahy, že stupeň oslnění je tím vyšší, čím vyšší je jas oslňujícího zdroje  $L_z$  (ve směru ke kontrolnímu místu) a čím větší je prostorový úhel  $\Omega$ , pod nímž je z kontrolního místa vidět oslňující zdroj. Naopak oslnění klesá, pokud roste průměrný jas pozadí  $L_p$ . Činitel oslnění pro jeden oslňující světelný zdroj (resp. svítidlo) lze tedy zapsat ve tvaru

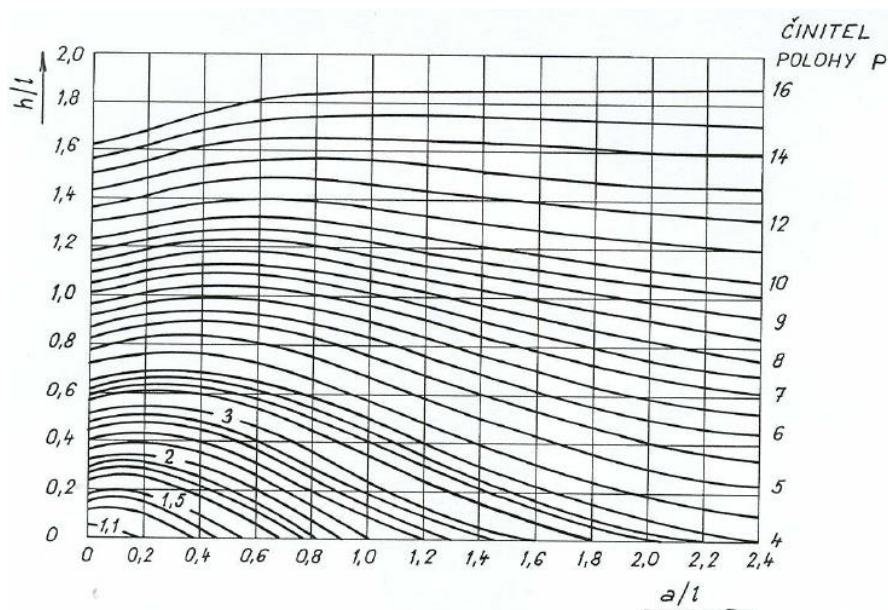
$$G = \frac{L_z^a \cdot \Omega^b}{L_p^c \cdot p^d} \quad (-; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{sr}; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; -), \quad (2.1)$$

kde  $p$  je činitel polohy vyjadřující vliv umístění zdroje oslnění vůči ose směru pohledu, určený nejčastěji podle Luckieshe a Gutha z diagramu na obr. 2-1. Konstanty  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  jsou empiricky určené hodnoty. Jejich hodnoty se liší podle autorů, kteří experiment prováděli. Příklady hodnot, kterých nabývají tyto konstanty jsou uvedeny v tab. 2-1 [1,2].

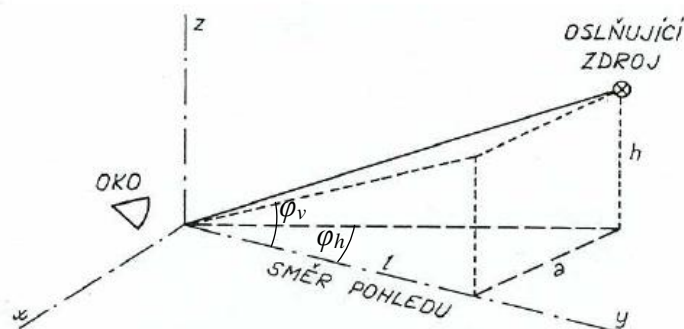
Tab. 2-1: Koeficienty pro výpočet činitele oslnění [1].

autor	exponent			
	$a$	$b$	$c$	$d$
Netušil	1	0,4	0,5	1
Harrison	2	1	0,6	1
Arndt, Bodmann, Muck	1	0,33	0,66	1
Hopkinson	1,6	0,8	1	1,6
Sørensen	2	1	1	2

Geometrické uspořádání oslňujícího zdroje a oka pozorovatele pro odečítání činitele polohy  $p$  je na obr. 2-2. Vzdálenost  $a$  je boční vzdálenost oslňujícího zdroje od vertikální roviny proložené osou pohledu, vzdálenost  $h$  značí výšku oslňujícího zdroje nad vodorovnou rovinou proloženou osou pohledu a  $l$  vyjadřuje vzdálenost oka pozorovatele od roviny proložené oslňujícím zdrojem kolmo k ose pohledu. Průběh činitele polohy podle obr. 2-1 poté závisí na poměru vzdáleností  $a/l$  a  $h/l$ .



Obr. 2-1: Nomogram Luckieshe a Gutha pro stanovení činitele polohy  $p$  v závislosti na umístění oslňujícího zdroje vůči ose pohledu (převzato z literatury [1]).



Obr. 2-2: Geometrické uspořádání oslňujícího zdroje a oka pozorovatele (převzato a modifikováno z literatury [1]).

Pokud se v hodnocené osvětlovací soustavě vyskytuje více oslňujících zdrojů, celkový činitel oslnění se buď vypočte sečtením jednotlivých činitelů oslnění pro jednotlivé zdroje, anebo autoři metod předepisují složitější postupy. Jelikož zrak má citlivost spíše logaritmickou, a i vnímání oslnění vzhledem k činiteli oslnění je spíše logaritmickou záležitostí, užívá se logaritmického vyjádření činitele oslnění. Tento logaritmus činitele oslnění se násobí patřičnou konstantou a takto vyjádřený vztah se nazývá index oslnění. Takto upravený vztah činitele oslnění dovoluje lépe objektivně vystihnout subjektivní změny pocitu pozorovatelů o stupni oslnění. Jedním ze vztahů pro index oslnění je Sørensenův vztah

$$GI_S = 8 \cdot \log \left| \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \frac{L_{zi}^2 \cdot \Omega_i}{L_{pi} \cdot p_i^2} \right| \quad (-; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{sr}; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; -). \quad (2.2)$$

S využitím Sørensenova vztahu je vytvořen tzv. Jednotný systém hodnocení oslnění (UGR). Tento systém je v současnosti uznáván a doporučován v rámci Mezinárodní komise pro osvětlování CIE a rovněž v rámci evropských předpisů. V tomto systému hodnocení se pak již místo indexu oslnění  $GI_s$  pracuje s činitelem oslnění UGR

$$UGR = 8 \cdot \log \left| \frac{0,25}{L_p} \sum_{i=1}^n \frac{L_{zi}^2 \cdot \Omega_i}{p_i^2} \right| \quad (-; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{sr}; -), \quad (2.3)$$

kde jas pozadí či adaptační jas  $L_p$  pro výpočet UGR je definován jako rovnoměrný jas celého okolí, který v místě oka pozorovatele ve svislé rovině zajistí stejnou osvětlenost jako skutečné zorné pole bez oslňujících zdrojů,  $L_{zi}$  je jas  $i$ -tého oslňujícího zdroje,  $\Omega_i$  je prostorový úhel, který zaujímá oslňující zdroj z místa pohledu, kde se oslnění hodnotí a  $p_i$  je činitel polohy  $i$ -tého zdroje oslnění [1,2].

Běžně se jas pozadí  $L_p$  stanovuje podle vztahu (2.4) z nepřímé složky vertikální osvětlenosti  $E_{nv}$

$$L_p = \frac{E_{nv}}{\pi} \quad (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{lx}; -). \quad (2.4)$$

Obecné řešení nepřímé osvětlenosti  $E_{nv}$  v interiéru se získá následujícím postupem. Nejprve se světelně činné plochy rozdělí na dílčí části, stanoví se počáteční rozdělení toků svítidel a vyřeší se proces mnohonásobných odrazů mezi všemi uvažovanými dílčími povrchy. Následně se stanoví výsledné rozdělení toků a posléze i jasy jednotlivých dílčích povrchů. Vychází se z předpokladu, že zjištěné jasy jsou po povrchu těchto dílčích sekundárních zdrojů rovnoměrně rozděleny. Nakonec se osvětlenost  $E_{nv}$  stanoví jako součet osvětleností vypočtených ve světelném poli jednotlivých dílčích povrchů (sekundárních zdrojů s daným jasem) ve svislé rovině proložené okem pozorovatele v kontrolním bodě umístěném do oka pozorovatele.

Podle literatury [1] podrobnější výpočty prokázaly, že hodnoty činitele oslnění UGR ze vztahu (2.3) jsou málo citlivé na odchylky ve stanovení jasu pozadí. Např. hodnoty jasu pozadí lišící se o 33 % způsobí změnu o jednu UGR jednotku. Může se tedy vyjít z předpokladu rovnoměrného osvětlení povrchů v dané místnosti a v některých případech se připouští i zjednodušené určení nepřímé vertikální osvětlenosti  $E_{nv}$  oka pozorovatele jako osvětlenosti zjištěné světlem odraženým od stěn uvažované místnosti [1,2].

Prostorový úhel  $\Omega$ , pod kterým pozorovatel vidí svítící plochu  $A_p$  oslňujícího svítidla, se vypočte podle vztahu

$$\Omega = \frac{A_p}{r^2} \quad (\text{sr}; \text{m}^2; \text{m}), \quad (2.5)$$

kde  $A_p$  je průmět svítící plochy svítidla do roviny kolmé ke směru spojnice středu oslňující plochy s okem pozorovatele a  $r$  je vzdálenost mezi středem oslňující plochy svítidla a okem pozorovatele.



Jas zdroje oslnění  $L_z$  se vypočítá ze svítivosti svítidla  $I_\gamma$  ve směru k pozorovateli a plochy průmětu  $A_p$  podle vztahu

$$L_z = \frac{I_\gamma}{A_p} \quad (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd}; \text{m}^2). \quad (2.6)$$

Činitel polohy  $p$  pro výpočet UGR se stanovuje z nomogramu Luckieshe a Gutha stejným postupem jako při výpočtu činitele oslnění  $G$ . Činitel polohy lze také stanovit z tabulky uvedené v literatuře [3]. Činitel polohy podle Luckieshe a Gutha není definován pro případy, ve kterých by se oslňující svítidla nacházela pod směrem pohledu pozorovatele. Metodiku UGR tak nelze použít v případě, kdy by světelné paprsky z oslňujícího zdroje do oka pozorovatele dopadaly z dolního poloprostoru.

Kromě použití diagramu nebo tabulky lze pro výpočet činitele polohy  $p$  použít řadu empirických matematických vztahů. Tyto vztahy jsou ale většinou zatíženy velkou chybou a jejich použití je možné jen pro určitou oblast danou poměry vzdáleností  $a/l$  a  $h/l$ . Jedním z nejpřesnějších analytických vyjádření činitele polohy je matematické vyjádření popsané v literatuře [4]. V uvedené literatuře je vysoké přesnosti při výpočtu činitele polohy  $p$  dosaženo díky použití polynomu 12. stupně.

### 2.2.1 Hodnotící stupnice UGR

Ve velké řadě případů se v osvětlovacích soustavách hodnota UGR pohybuje v rozsahu od 10 do 30. Norma ČSN EN 12464-1 doporučuje mezní hodnoty UGR, které tvoří řadu jejíž stupně odpovídají patrným změnám v oslnění. Tato řada UGR je 10, 13, 16, 19, 22, 25 a 28 [5]. Stupnici hodnot UGR odpovídají jednotlivé kategorie subjektivního vnímání oslnění. K posouzení vjemu rušivého oslnění pozorovatelem je často používána stupnice založena na kritériích podle Hopkinsona [6]. Řadě hodnot UGR jsou přiřazeny jednotlivé stupně vnímání rušivého oslnění podle tab. 2-2. Osvětlovací soustavy s UGR menším než 10 jsou považovány za neschopné produkovat rušivé oslnění [7].

Tab. 2-2: Stupně vnímání rušivého oslnění v závislosti na hodnotě UGR [7].

Stav oslnění	Hodnota UGR
Neznatelné	10
Právě znatelné	13
Znatelné	16
Právě přijatelné	19
Nepřijatelné	22
Právě nepříjemné	25
Nepříjemné	28

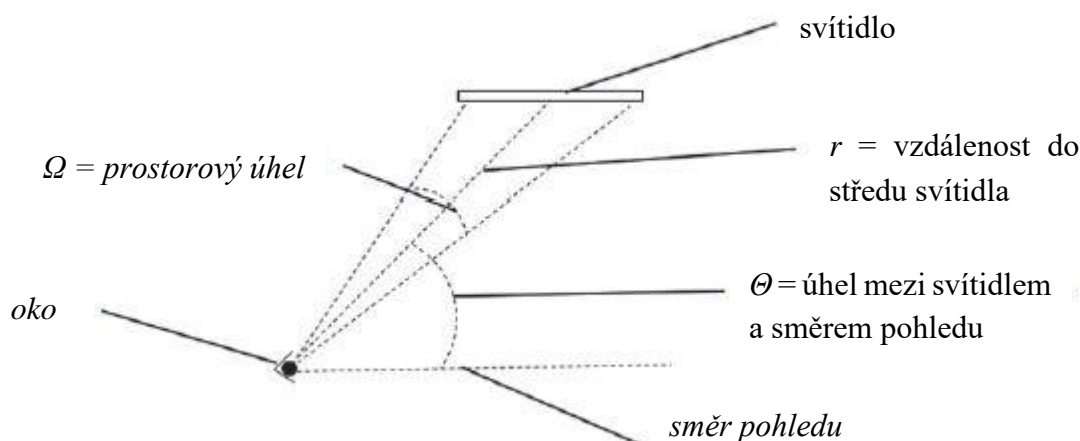
Maximální dovolená hodnota UGR je závislá na druhu vykonávané činnosti a pracovním prostorem. Pro příklad jsou v tab. 2-3 uvedeny mezní hodnoty činitele oslnění UGR pro různé prostory a vykonávané činnosti [2].

Tab. 2-3: Mezní hodnoty činitele oslnění UGR [2].

Pracoviště		UGR ( $GI_s$ )
pracoviště s počítači		16
kanceláře, dozorný		19
průmyslová pracoviště	jemná výroba	22
	běžná výroba	25
	hrubá výroba	28

## 2.3 Omezení systému hodnocení oslnění UGR

Metoda hodnocení přímého oslnění pomocí indexu oslnění UGR není universální a má svá omezení. Jedno z hlavních omezení je její platnost pro hodnocení oslnění od tzv. "normálních" zdrojů světla, které jsou vidět pod prostorovými úhly v rozsahu od 0,0003 do 0,1 sr. To v běžných vnitřních prostorech odpovídá svítidlům s vyzařovací plochou v rozsahu cca od 0,005 m<sup>2</sup> do 1,5 m<sup>2</sup>. Pro svítidla s menšími rozměry je tato metoda příliš přísná a pro svítidla s většími rozměry je příliš tolerantní. Z tohoto důvodu nelze touto metodou hodnotit oslnění například od bodových zdrojů světla a svítících stropů nebo v nepřímých osvětlovacích soustavách. Prostorový úhel je naznačen na obr. 2-3 [8].



Obr. 2-3: Znázornění parametrů pro UGR (modifikováno z literatury [9]).

### 2.3.1 Rozšíření UGR – pro malé zdroje

Jak již bylo zmíněno metodika UGR byla odvozena pro tradiční světelné zdroje, jako jsou například žárovky a je tedy platná jen pro zdroje oslnění, které jsou vidět pod prostorovými úhly v rozsahu od 0,0003 do 0,1 sr. Mezinárodní komise pro osvětlování stanovila rozšíření metodiky UGR pro malá svítidla a tyto svítidla se tak hodnotí podle  $UGR_{small}$

$$UGR_{small} = 8 \cdot \log \left| \frac{0,25}{L_p} \sum_{i=1}^n 200 \cdot \frac{I_i^2}{r_i^2 \cdot p_i^2} \right| \quad (-; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd}; \text{m}; -), \quad (2.7)$$

kde  $I_i$  je svítivost i-tého zdroje oslnění ve směru k pozorovateli a  $r_i$  je vzdálenost i-tého zdroje oslnění od pozorovatele.

Toto hodnocení je tedy pro malé zdroje oslnění, které jsou menší než  $0,005 \text{ m}^2$ . Hodnocení pro malé zdroje oslnění je založeno na výzkumu Paula a Einhorna uvedeného v [10]. V tomto experimentu byla nastavována postupně vzdálenost mezi pozorovateli a zdrojem oslnění na 1,4 m, 2,3 m a 4 m a byl studován efekt měnící se vzdálenosti mezi zdrojem a pozorovatelem. Zdroj oslnění byl upevněn  $16^\circ$  nad směrem pohledu. Jas pozadí byl nastaven na určitou hodnotu. Pozorovatelé poté nastavovali jas zdroje oslnění, dokud jim oslnění nezpůsobilo nepříjemný pocit. Výsledkem bylo, že pro malé zdroje mimo směr pohledu je efektivní průmětná plocha konstantní. V důsledku toho byl použit zdroj oslnění normální velikosti (prostorový úhel mezi  $0,0003$  a  $0,1 \text{ sr}$ ) a byl proveden stejný experiment. Porovnáním dat z měření malé a normální velikosti zdroje oslnění byla stanovena průmětná plocha na  $0,005 \text{ m}^2$  pro malé zdroje oslnění. Z tohoto důvodu byl vztah (2.3) pro UGR upraven na vztah (2.7). V tomto vztahu byl nahrazen jas zdroje a prostorový úhel svítivosti  $I$ , průmětnou plochou a vzdáleností  $r$  mezi zdrojem oslnění a okem. Průmětná plocha je  $A_p = 0,005 \text{ m}^2$  a tuto hodnotu reprezentuje číslo 200 ve vztahu (2.7) [11].

Takto upravená metodika hodnocení oslnění pomocí UGR pro malé zdroje oslnění je však založena na měření žárovky jako světelného zdroje a je tak sporné, zdali může být použita při použití LED jako světelného zdroje.

## 3 MĚŘENÍ RUŠIVÉHO OSLNĚNÍ

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, rušivé oslnění se vyšetřuje statistickým zpracováním výsledků experimentálních měření. Tato kapitola popisuje určité metodiky těchto pokusných měření.

### 3.1 Subjektivní hodnocení

Rušivé oslnění je obvykle hodnoceno pomocí subjektivního měřítka. Tyto subjektivní odezvy na rušivé oslnění ale vykazují vysokou variabilitu. Korelace mezi předpokládanou úrovní oslnění a individuálním nebo skupinovým hodnocením oslnění je typicky nízká. Je tedy potřebné, při experimentálním měření rušivého oslnění, vybrat korektní metodu pro tato měření tak, aby výsledná naměřená data byla věrohodná [12].

Pro subjektivní vyhodnocení rušivého oslnění osobami účastnících se experimentálního měření se nejčastěji používají tyto čtyři metody:

1. Hodnotící metoda používající sémantický diferenciál.
2. Párová srovnávací metoda.
3. Metoda prostého označení.
4. Kategorizace rušení.

První metoda využívající sémantický diferenciál umožňuje zjistit psychologický postoj konkrétního člověka k dané situaci, nejčastěji v sedmistupňové škále. Sémantickým diferenciálem se tak rozumí psychologická metoda k zjištění nuancí v postojích respondentů prostřednictvím dotazníku. Většina studií zabývajících se vyhodnocením rušivého oslnění pomocí této metody využívá sedmistupňovou nebo devítistupňovou škálu hodnocení. Nejpoužívanější je sedmibodová stupnice se slovním vyjádřením stavu oslnění podle tab. 2-2.

Druhá metoda používaná k získání subjektivního hodnocení rušivého oslnění je párová srovnávací metoda. Při této metodě subjekty účastnící se měření rozhodují, který ze dvou zdrojů oslnění, současně přítomných v zorném poli subjektu, způsobuje větší rušení. Jde tak o metodu třídící. Oproti první metodě, která hodnotí různé podněty samostatně pomocí společné stupnice, tato třídící metoda porovnává různé podněty přímo vůči sobě. Výhodou párové srovnávací metody je malá rozdílnost mezi získanými daty od jednotlivých subjektů účastnících se experimentu. Samotná metoda ovšem neposkytuje informace o konkrétním pozorovatelově hodnocení daného podnětu, výstupem metody je pouze pořadí měřených podnětů oslnění. Pro získání více informací o měřeném podnětu, může pozorovatel hodnotit dva porovnávané subjekty vůči sobě, za pomoci číselné stupnice.

Ve třetí metodě vyhodnocení rušivého oslnění subjekt nastavuje úroveň daných proměnných, dokud nenarazí na předem definované kritérium. Například pozorovatel může nastavovat jas světelného zdroje, dokud nevytvoří hranici vnímání mezi stavem s rušivým oslněním a bez rušivého oslnění. Při této metodě musí být přesně stanovená kritéria, kterých má být dosaženo a nastavování daných proměnných musí provádět samotný subjekt účastnící se tohoto měření.

Poslední metoda slouží k zjištění základní informace, zda se rušivé oslnění zvyšuje, nebo snižuje. Subjektu účastnického se měření jsou pokládány otázky, např.: „Způsobuje světelný zdroj oslnění?“ Skladba odpovědí subjektů poté udává, jestli zdroj oslnění způsobuje rušení, nebo ne [12].

### 3.1.1 Vlivy na hodnocení rušivého oslnění

Faktorů, které přispívají k nízké korelaci mezi subjektivním hodnocením a předpokládanou úrovní oslnění může být mnoho. Mezi tyto faktory patří problémy spojené s měřením jasu moderních svítidel, procedurální faktory zvolené metody hodnocení nebo psychologické a demografické proměnné subjektů účastnických se hodnocení rušivého oslnění.

První faktor představuje problémy spojené s měřením jasu moderních (LED) svítidel. Hodnoty jasu jsou vypočítány z fotometrických měření na daném svítidle. Měřenou veličinou je osvětlenost, svítivost (a jas) je zpětně vypočítaná z tohoto měření. Tímto je stanovena křivka svítivosti svítidla, založená na změřené osvětlenosti. Pro svítidla s jednotnou vyzařovací plochou je to akceptovatelné řešení, ale pro svítidla s nejednotnou vyzařovací plochou to nepodává příliš detailní informace. Vypočítaná hodnota rušivého oslnění pomocí metodiky UGR bude stejná, při stejné průměrné hodnotě jasu a dalších parametrů, nezávisle na distribuci jasu svítících ploch svítidla.

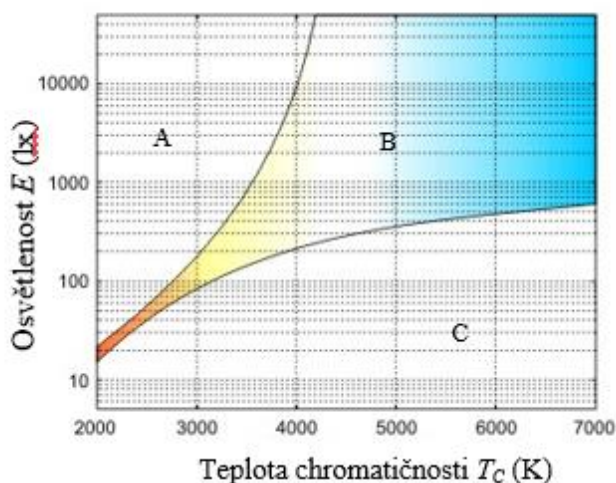
Procedurální faktory ovlivňují hodnocení rušivého oslnění. Rozdílné pokyny dané subjektu účastnického se pokusného měření mohou vést k rozdílným výsledkům. Chápání významu pojmu oslnění se může pro různé subjekty velmi lišit, což vede k velkému rozptylu mezi jednotlivými hodnoceními. Vnímání rušivého oslnění je také závislé na přítomnosti a obtížnosti prováděné zrakové činnosti. Mezi psychologické faktory pak patří nálada subjektu při hodnocení, úroveň úzkosti a stresu může mít také vliv na vnímání oslnění. Dlouhá doba (v řádu hodin) v přítomnosti zdroje oslnění je také vnímána jinak než krátké trvání oslnění.

Několik studií zkoumá vliv demografických proměnných na rušivé oslnění. Věk subjektů má vliv na vnímání oslnění. Starší subjekty mají nižší práh jasu, který u nich vyvolá pocit zrakové nepohody. Dále byla objevena malá korelace mezi rušivým oslněním a barvou očí subjektů [11].

Dalším vlivem na hodnocení rušivého oslnění může být teplota chromatičnosti oslňujícího zdroje. Teplota chromatičnosti svým způsobem ovlivňuje vnímání prostoru z hlediska zrakové pohody. Vliv na zrakovou pohodu vychází z fyziologických aspektů zrakového vnímání, které respektují proměnlivou teplotu chromatičnosti světla během dne. Nižším hodnotám osvětlení odpovídají nižší teploty a naopak. Umělá osvětlovací soustava by měla respektovat tyto fyziologicky nastavené skutečnosti, a proto teplota chromatičnosti světla zdrojů by měla být v určitém souladu s hladinou osvětlenosti v dané místnosti. Tuto závislost popisuje Kruithofův diagram vyobrazený na obr. 3-1.

Tento diagram je rozdělen na tři oblasti. První oblast diagramu (oblast A) představuje psychický pocit přesvětlení a zkreslení barev. Pro nízké teploty chromatičnosti nastává tato oblast již při nízkých hladinách osvětlenosti. Střední oblast (oblast B) navozuje příjemný pocit

z osvětlení. Světelný zdroj pohybující se v oblasti C pak vyvolává dojem nedostatku světla a působí studeně.



Obr. 3-1 Kruithofův diagram (modifikováno z <https://goo.gl/UGPk5U>).

Přestože se Kruithofův diagram používá jako vodítko pro návrh osvětlovacích soustav, některé studie nepovažují tento diagram za důvěryhodný. Kruithof nepopisuje způsob hodnocení, nezávislé proměnné, ani zkušební vzorek, který byl použit k vytvoření křivky. Závislost teploty chromatičnosti světla zdrojů na osvětlenosti a vliv na zrakovou pohodu je však všeobecně znám a tento jev by měl být brán v úvahu při pokusném subjektivním vyhodnocování oslnění [1,2,13].

### 3.2 Objektivní měření

Jelikož subjektivní hodnocení je limitováno v přesnosti vzhledem k velkým rozdílům mezi jednotlivci, je žádoucí stanovit objektivní měření rušivého oslnění, což by vedlo ke zvýšení spolehlivosti určení předpokládaného oslnění.

Základní mechanismus, který vede ke vnímání rušivého oslnění není přesně určen. Rušivé oslnění může způsobit málo znatelné změny v očích a obličejových svaích, mrkání, mračení, a dokonce i slzení.

Jedním z možných přístupů k objektivnímu měření odezvy na rušivé oslnění je zkoumání reakce zornice na oslnění. Experimentální měření v literatuře [14] se zabývá spojitostí konstriktce zornice a rušivého oslnění. Závěry této studie předkládají korelaci mezi subjektivním hodnocením a relativní velikostí zornice (korelační koeficient  $r = -0,61$ ). Pokud tedy zdroj oslnění produkuje větší rušení, zornice bude menší, oproti stavu bez oslnujících stimulů. Uvedená studie také vyšetřuje závislost mezi subjektivním hodnocením a průměrnou rychlostí pohybu očí získanou z elektrookulogramu. Při větších oslnujících stimulech byla taktéž větší průměrná rychlost pohybu očí, zvláště u starších subjektů (s průměrným věkem 60,8 let, směrodatná odchylka  $\sigma = 3,9$ ).

Další možnost objektivního měření vyšetřuje elektrickou aktivitu spojenou s obličejovými svaly kolem očí a její vztah k rušivému oslnění. Studie předpokládají, že rušivé oslnění způsobují subtilní, bezděčné kontrakce těchto svalů v reakci na oslnění. Činnost svalů se měří pomocí elektromyografie. Tato objektivní metoda měření dobře koreluje se subjektivním hodnocením.

---

Studie zároveň udávají, že činnost těchto obličejových svalů není zdrojem rušení, ale naopak je rušením způsobena. Příčina rušivého oslnění tak stále není přesně objasněna. Jasně identifikovaná metoda objektivního měření není stanovena, ale uvedené způsoby měření naznačují, že objektivní měření rušivého oslnění je možné [12].

## 4 NEUNIFORMNÍ ZDROJE OSLNĚNÍ

Pozornost na správné hodnocení rušivého oslnění vzrostla při uvedení LED světelných zdrojů pro široké využití v osvětlovacích soustavách. Možnosti LED světelných zdrojů dovolují použití mnoha nových typů svítidel v osvětlovacích soustavách. Velký kontrast jasu a vysoké lokální špičky jasu na povrchu vyzařování některých těchto svítidel vyvolávají větší rušivé oslnění u pozorovatele, než je očekáváno při výpočtu hodnot pomocí UGR. Tento nesoulad mezi výpočtem rušivého oslnění pomocí UGR a subjektivně vnímaného rušivého oslnění některých těchto svítidel je v současnosti předmětem zkoumání mnoha studií.

Tyto studie ukazují, že při stejném průměrném jasu je zde významný rozdíl v rušivém oslnění mezi uniformním a neuniformním typem svítidla. Vyhodnocení rušivého oslnění pomocí metodiky UGR, která počítá s touto průměrnou hodnotou jasu, tak není vždy spolehlivé pro tato svítidla s neuniformní plochou vyzařování.

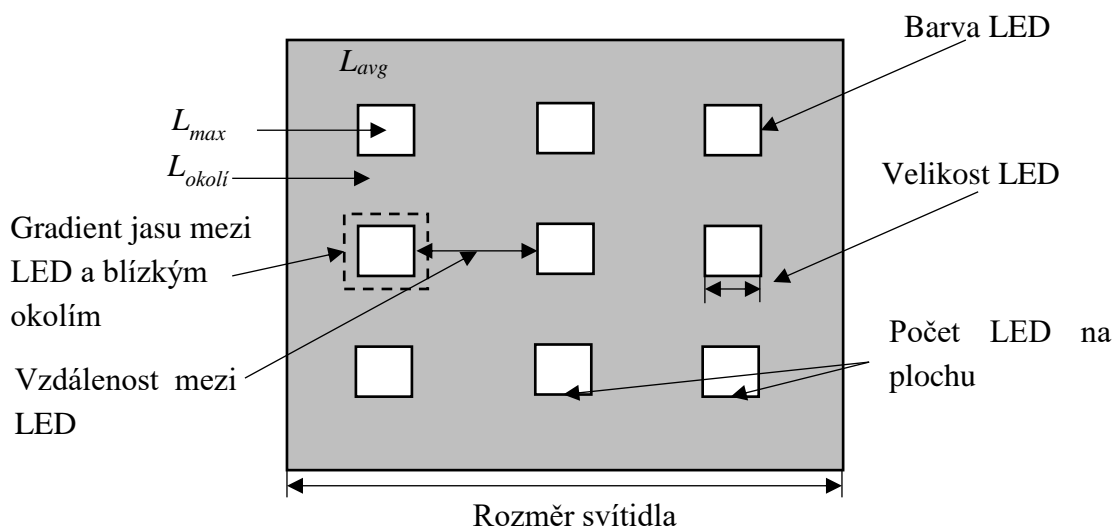
### 4.1 Neuniformita

K pojmu ‘neuniformity’ vyzařovací plochy svítidla se přistupuje několika rozdílnými způsoby. Některé studie přistupují k porovnání kompletně uniformního světelného zdroje s pixelovým maticovým světelným zdrojem s jednotlivými LED a variacemi v rozteči LED, hustotě LED a velikosti světelného zdroje. Kromě porovnání kompletně uniformního zdroje se zdrojem, který tvoří holé LED diody uspořádané v matici s vysokým kontrastem jasu jsou zde další varianty neuniformity, které jsou studovány. Některé studie rozlišují různé poměry jasů (periferní, od zdroje), jasového gradientu mezi LED a jejím okolím nebo procentním vyjádřením jasu plochy. Taktéž je studován dopad neuniformity svítidla na ostatní proměnné ovlivňující rušivé oslnění, vyšetřuje se vliv směru pohledu (přímý a nepřímý pohled ke zdroji oslnění), jasu pozadí a vliv zrakového úkonu.

Většina studií nahlíží na neuniformitu svítidla jako na poměr mezi maximálním jasnem a průměrným jasnem tohoto svítidla. Ale další aspekty způsobující neuniformitu, které mohou způsobit rozdíly ve vnímání rušivého oslnění nejsou brány v úvahu. Jelikož neuniformní svítidlo je ve většině případů chápáno jako LED svítidlo, mezi tyto další aspekty tak patří například velikost LED, počet LED na vyzařovací plochu a gradient jasu mezi maximální špičkou jasu LED a jasu blízkého okolí. Parametry LED svítidla, které mohou mít vliv na vnímání oslnění a na uniformitu jsou vyobrazeny na obr. 3-1 [15].

Ačkoli je na neuniformitu svítidla nahlíženo z více pohledů, lze říci, že neuniformní svítidla jsou více oslňující než uniformní zdroje při stejném průměrném jasu.





Obr. 4-1: Parametry svítidla, které ovlivňují vnímání oslnění a mají vliv na uniformitu svítidla (převzato a upraveno z literatury [15]).

## 4.2 Vliv kontrastu jasu na uniformitu

Vliv kontrastu jasu na uniformitu je vyšetřován kvantitativně a je vyjadřován jako poměr jasu. Používá se například poměr maximálního a minimálního jasu ( $L_{max}/L_{min}$ ), Weberův kontrast ( $\Delta L/L_{avg}$ ), Michelsonův kontrast  $((L_{max}-L_{min})/(L_{max}+L_{min}))$  nebo jednotka jasu ( $L_{avg}/L_{max}$ ). Jak již bylo zmíněno, čím menší je jednotnost vyzařovací plochy svítidla, tím větší je vnímané rušivé oslnění. Uniformita se snižuje v následujících případech:

- Menší poměr mezi LED a zbytkem zdroje oslnění (což zahrnuje menší velikost LED, méně LED na plochu a strmější gradient jasu).
- Vyšší jas LED uvnitř svítidla.
- Větší poměr jasu mezi LED a bezprostředním okolím.

Výsledný podnět je pak tvořen různou kombinací těchto parametrů. Například v případě konstantního průměrného jasu má pozvolnější gradient jasu okolo LED za následek nižší špičkovou hodnotu jasu [15].

## 4.3 Vliv počtu a rozměru LED

Vliv počtu LED a jejich rozměru na uniformitu svítidla byl ověřen v konfiguraci, kdy se měnil počet LED a jejich velikost ve zdroji oslnění, zatímco průměrný jas byl konstantní. Bylo ověřeno, že s klesajícím počtem LED a se zmenšováním jejich rozměrů bylo dosaženo většího oslnění od zkoumaného svítidla. Což je způsobeno tím, že méně LED nebo jejich menší rozměry, při konstantním průměrném jasu, vyžadují vyšší jas na jednotlivé LED [15].

#### 4.4 Vliv vzdálenosti mezi LED

Několik studií se zabývalo vlivem vzdálenosti LED a jejich roztečí na rušivé oslnění. Závěrem z těchto prací lze konstatovat, že pro přímý směr pohledu do zdroje oslnění v oblasti blízké zrakové ostrosti v centrální jamce, se rušivé oslnění zdá narůstající se zvětšující se roztečí LED do rozteče LED okolo  $0,14^\circ$ . Pro větší LED rozteče nemá vzdálenost mezi LED žádný dopad na rušivé oslnění. Pro periferní vidění, mezi ostatními parametry, je vnímání rušivého oslnění ovlivněno úhlem mezi oslňujícím svítidlem a směrem pohledu a roztečí LED. Pokud je LED rozteč větší než zraková ostrost v odpovídající pozici v sítnici, rušivé oslnění je obecně větší v porovnání s LED roztečí, která již nemůže být rozlišena naším zrakem [15].

#### 4.5 Vliv pozorovacího úhlu

Obecně lze konstatovat, že největší rozdíl mezi uniformním a neuniformním svítidlem byl pozorován při ostrém centrálním vidění. Čím více byl zdroj oslnění periferní, tím menší rozdíl byl mezi uniformním a neuniformním zdrojem oslnění. Většinou při úhlu  $30^\circ$  (a větším) nad směrem pohledu je již rozdílnost rušivého oslnění, vnímaného z důvodu neuniformity, téměř zanedbatelná.

Konkrétní úhel mezi oslňujícím svítidlem a směrem pohledu, při němž již rozdíly v rušivém oslnění způsobené neuniformitou nejsou patrné, není ale přesně stanoven a ukazuje se, že záleží na dané situaci. Například byl vyšetřován vliv pozorovacího úhlu, z hlediska neuniformity, při veřejném osvětlení. Pozorovatelé měli rozlišit jednotlivé LED ve svítidle s určitým rastrem těchto LED. Bylo zjištěno, že pozorovatelé nebyli schopni rozlišit jednotlivé body LED při úhlu větším než  $10^\circ$ . Dalším předmětem zkoumání bylo zrakové chování v reálných prostorách kancelářského typu. Byl pozorován častější přímý pohled do stropního oslňujícího svítidla při oslňujícím zdroji s neuniformní distribucí jasu než při uniformním svítidle [15].

#### 4.6 Vliv jasu pozadí

Ačkoli je jas pozadí již uznávaný jako základní parametr pro posouzení rušivého oslnění, stále může být jeho vliv rozdílný pro neuniformní zdroje oslnění oproti uniformním. V souladu s UGR, všechny studie pozorovaly menší rušivé oslnění při větším jasu pozadí [15].

## 5 HODNOCENÍ RUŠIVÉHO OSLNĚNÍ OD NEUNIFORMNÍCH ZDROJŮ OSLNĚNÍ

Jak bylo popsáno v předchozí kapitole, jednotnost vyzařovací plochy svítidla má vliv na vnímání rušivého oslnění od tohoto oslňujícího zdroje. Je proto nutné upravit současnou doporučovanou metodu hodnocení oslnění pomocí UGR tak, aby tuto skutečnost zahrnovala ve svém výpočtu. V této kapitole budou rozebrány jednotlivé studie zabývající se hodnocením oslnění od neuniformních svítidel.

### 5.1 UGR pro neuniformní zdroje oslnění

Jednou z prací zabývajících se problematikou použití činitele oslnění UGR pro hodnocení neuniformních zdrojů oslnění je studie vypracovaná v literatuře [16].

LED svítidla jsou již běžně používána pro interiérové a exteriérové osvětlování v důsledku rychlého vývoje v oblasti polovodičů. Díky jejich rychlému rozvoji LED světelné zdroje začaly postupně nahrazovat zářivková, halogenová a další běžně používaná svítidla v interiérovém osvětlování. Pro zajištění správného vnitřního osvětlování musí být, mezi jinými parametry, vyčíslena hodnota oslnění a toto oslnění musí být omezeno podle předepsané úrovně. Doporučované hodnocení oslnění podle UGR ovšem není vhodné pro LED svítidla, která mají vysoce nejednotné rozložení jasu, protože tato svítidla se skládají z jednotlivých LED o vysokém jasu. Z tohoto důvodu byla tato studie zaměřena na úpravu UGR skrze vyčíslení subjektivní odezvy pozorovatele na tato neuniformní svítidla.

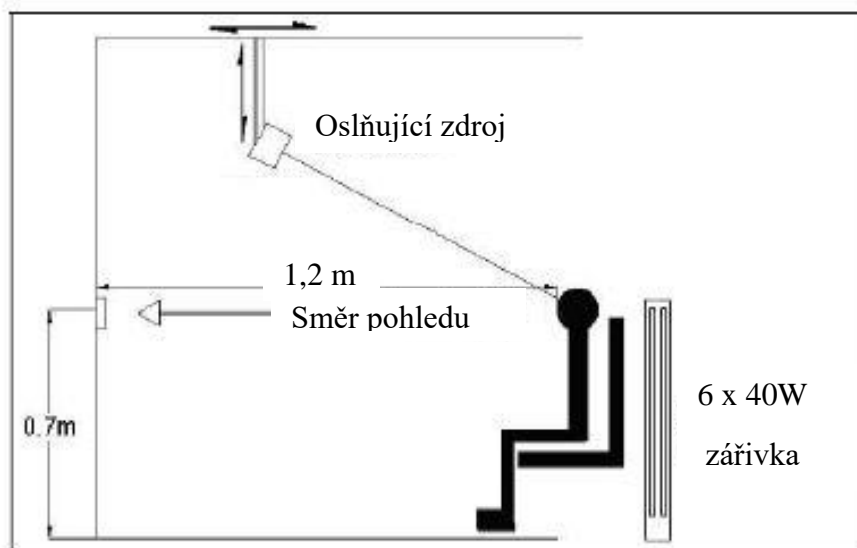
Bylo provedeno pokusné měření, ve kterém se subjektivně vyhodnocovaly stimuly od testovaných svítidel. Vyjádření velikosti vjemu rušivého oslnění bylo provedeno podle stupnice znázorněné v tab. 5-1. Těmto stavům oslnění pak odpovídají uvedené hodnoty UGR [16].

*Tabulka 5-1: Stupnice UGR [16].*

Stav oslnění	Hodnota UGR
Neznatelné	7
Právě znatelné	10
Znatelné	13
Právě přijatelné	16
Nepřijatelné	19
Právě nepříjemné	22
Nepříjemné	25
Právě nesnesitelné	28
Nesnesitelné	31

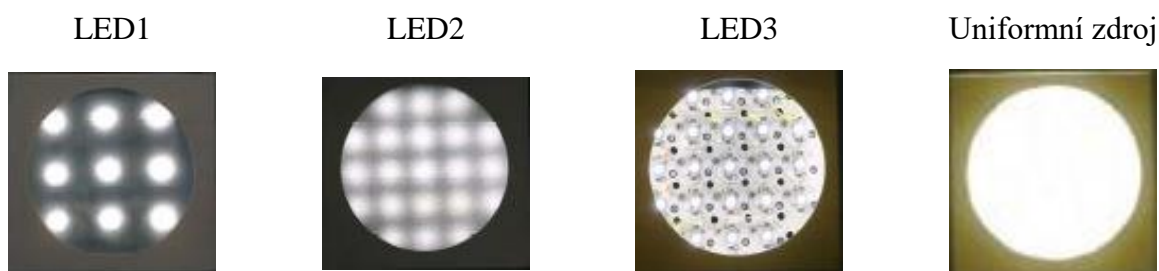
V pokusném měření byly měněny čtyři parametry UGR. Každé hodnoty UGR mohlo být dosaženo změnou jasu oslňujícího zdroje, jasu pozadí, vzdáleností mezi oslňujícím zdrojem a pozorovatelem (prostorový úhel) a změnou úhlu mezi oslňujícím svítidlem a směrem pohledu

(činitel polohy). Rozměry dané laboratoře byly ( $\text{Š} \times \text{D} \times \text{V}$ ) 4x2x2,2 m. Pro zlepšení jednotnosti jasu pozadí byla laboratoř vymalována difuzní bílou barvou. Situační náčrtek laboratoře je na obr. 5-1.



Obr. 5-1: Struktura laboratoře (upraveno z literatury [16]).

Při provedeném experimentu byly použita 4 svítidla. První svítidlo označeno jako LED1 mělo 9 LED, druhé a třetí (LED2, LED3) mělo 21 LED. Použité LED měly výkon 2 W a byla zde možnost napěťového stmívání. Vzdálenost od svítidla k pozorovateli byla 1,2 m a LED svítidlo produkovalo průměrný jas v rozsahu od  $1000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  do  $10000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Poměr maximálního a minimálního jasu svítidla byl ovládán filtrem na přední straně svítidla k nastavování jednoty jasu. Jednotlivé zdroje oslnění LED a žárovkový zdroj jsou vyobrazeny na obr. 5-2.



Obr. 5-2: Jednotlivé použité zdroje oslnění (převzato a upraveno z literatury [16]).

Nejprve bylo provedeno předběžné měření před hlavním experimentem k ověření rozdílu subjektivního vnímání oslnění od uniformního svítidla a LED svítidla. Tohoto měření se účastnili tři pozorovatelé. Byli konfrontováni se všemi konfiguracemi parametrů, které mají vliv na UGR.

Byly použity tři hodnoty průměrného jasu, tyto hodnoty jsou uvedeny v tab. 5-1. Pro vytváření jasu pozadí bylo instalováno žárovkové svítidlo. Svítidlo bylo umístěno tak, aby nevytvářelo stíny. V průběhu měření byly použity tři hodnoty jasu pozadí ( $18, 45$  a  $105 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Plocha vyzařování použitých LED svítidel byla kruhového tvaru o průměru 12 cm a prostorový úhel v tomto měření se mohl měnit v rozsahu  $0,006 \text{ sr}$  až  $0,015 \text{ sr}$ . Poslední parametr vstupující do výpočtu UGR je činitel polohy. Při experimentu byly použity dvě hodnoty činitele polohy a to 1,26 a 5 [16].

Tab. 5-1: Průměrný jas a poměr minimálního a maximálního jasu pro každé svítidlo [16].

		Uniformní zdroj			LED1			LED2			LED3		
$\frac{Min}{Max}$	(-)	0,78	0,80	0,80	0,13	0,12	0,11	0,27	0,31	0,32	0,07	0,08	0,08
$L_{Avg}$	( $cd \cdot m^{-2}$ )	1 132	4 700	8 605	1 150	4 450	8 300	1 114	4 659	8 536	1 322	4 591	8 880

Výsledkem předběžného experimentu bylo, že LED svítidla způsobovala větší nepříjemný pocit než zářivkové uniformní svítidlo. Také u svítidla LED3 byl pozorován větší rušivý pocit než u svítidla s filtrem LED2.

V předběžném experimentu tak byl pozorován vliv změny jednotlivých členů UGR a vliv jednotnosti jasu. Maximální a minimální hodnoty z předběžného experimentu byly použity v hlavním experimentu. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tab. 5-2. Hlavního experimentu se účastnilo 10 pozorovatelů [16].

Tab. 5-2: Hodnoty veličin použitých pro výpočet UGR v hlavním experimentu [16].

	$L_z$	$L_p$	$p$	$\Omega$
	( $cd \cdot m^{-2}$ )	( $cd \cdot m^{-2}$ )	(-)	(sr)
Min	1200	18	1,26	0,006
Max	8500	105	5	0,015

Výsledky hlavního experimentu vykazovaly stejné tendence jako v předběžném experimentu. Subjektivně vyjádřené hodnoty a vypočtené hodnoty UGR byly rozdílné. Byla provedena regresní analýza na úpravu subjektivního hodnocení uniformního zdroje oslnění s vypočtenými hodnotami UGR. Rovnice regrese (5.1) je vyjádřena jako

$$y = 0,3805x + 11,888 \quad (5.1)$$

kde  $x$  je vypočtená hodnota UGR a  $y$  je subjektivní hodnocení.

Po první analýze rozdíl mezi vypočtenou hodnotou UGR a subjektivním hodnocením se mírně zmenšil. Ale rozdíl způsobený neuniformitou stále přetrvával mezi jednotlivými svítidly. K omezení tohoto rozdílu byla provedena druhá regresní analýza. Druhá rovnice regrese se rovná

$$y = (1,0227 \cdot z^{0,0343x}) + (-1,1838 \cdot \ln z) - 0,2862 \quad (5.2)$$

kde  $x$  je výsledná hodnota z první analýzy,  $y$  je upravená hodnota po druhé analýze a  $z$  je uniformita jednotlivého svítidla vyjádřená jako poměr minimálního a maximálního jasu.

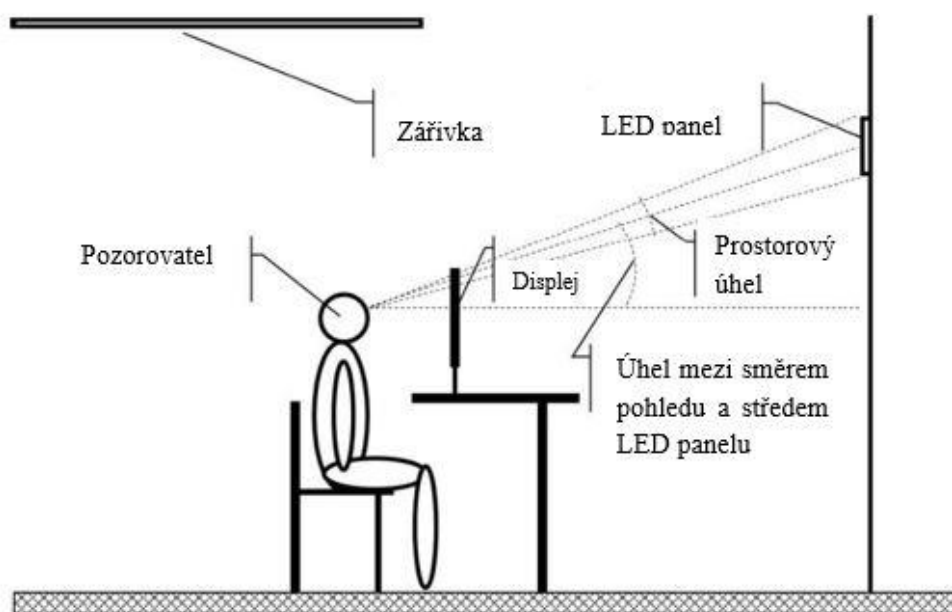
V příloze A jsou uvedeny příklady grafického zpracování subjektivního hodnocení oslnění a jednotlivé výsledky revizí provedené v této studii. Důsledkem druhé revize jsou rozdíly mezi jednotlivými svítidly způsobené neuniformitou minimální.

Tato studie tak provedla experiment pro úpravu UGR při vyhodnocování neuniformních svítidel. Je založena na subjektivním pozorování rušivého oslnění LED svítidel a zářivkového svítidla. Výsledkem této studie je, že uniformita jasu svítidla má velký vliv na rušivé oslnění. Byly provedeny dvě regresní analýzy. První rovnice regrese upravuje subjektivní vyhodnocování pro uniformní zdroj s vypočtenými hodnotami UGR. Druhá rovnice upravuje rozdíly způsobené neuniformitou jednotlivých LED svítidel. V souladu s dosaženými výsledky a rovnicemi může být UGR pro neuniformní svítidla revidováno. Důvěryhodnost dosažených výsledků ale může snižovat fakt, že prováděného subjektivního hodnocení se účastnil malý vzorek pozorovatelů (3 a 10 osob) [16].

## 5.2 Rušivé oslnění způsobené LED svítidlem

Další studie zabývající se problematikou použití činitele oslnění UGR pro hodnocení neuniformních zdrojů oslnění je studie vypracovaná v literatuře [17]. Ačkoli bylo provedeno mnoho studií o problematice rušivého oslnění způsobeného LED zdrojem, tyto studie se zaměřovaly převážně na svítidla s difuzorem. Je zde nedostatek kompletních studií o parametrech ovlivňující rušivé oslnění od svítidel s jednotlivými, holými LED. Tato studie se proto zabývá zkoumáním rušivého oslnění způsobeného svítidlem, které tvoří holé LED uspořádané do pravidelného maticového rozložení. Tato studie bude nyní blíže rozebrána.

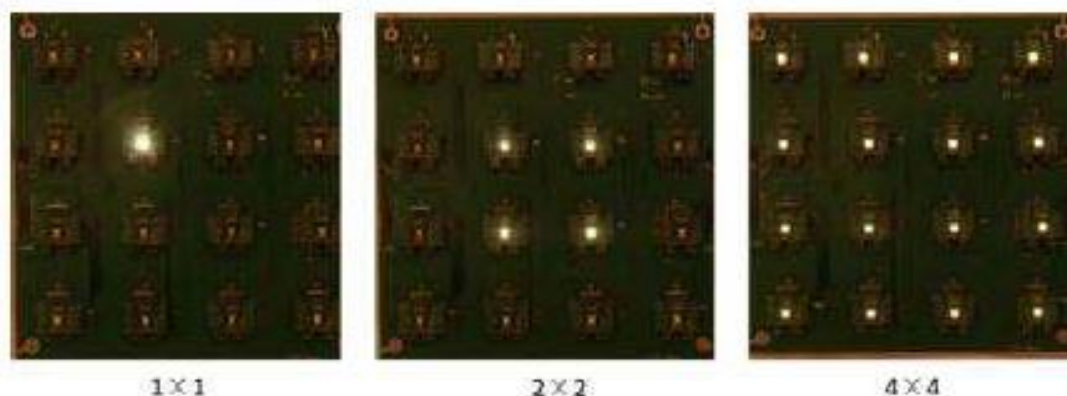
Pokusné měření bylo prováděno při konfiguraci znázorněné na obr. 5-3. Jednalo se o kancelářský prostor, kde na stěně byl umístěn panel s LED o velikosti 16 x 16 cm. Intenzita každé LED byla ovládána zvlášť. Všechny LED byly stejného typu s ekvivalentní teplotou chromatičnosti  $T_e = 4179$  K. Každý pozorovatel byl ve vzdálenosti 2,5 m od stěny s umístěným LED svítidlem a 60 cm od monitoru.



Obr. 5-3: Schematické znázornění rozmístění prvků při měření (převzato z [17]).

Tento experiment zahrnoval dva typy rozložení LED. První rozložení bylo provedeno jako rastr LED v konfiguraci 1×1, 2×2 a 4×4 (obr. 5-4). První rozložení je uvažováno jako uniformní, kdy LED jednotlivých konfigurací mají stejnou svítivost. Druhé rozložení bylo utvořeno jako

neuniformní vzor, jednotlivé vzory byly vytvořeny z vnitřního a vnějšího kruhu LED. Svítivost  $I_{tot}$  byla stejná pro všechny vzory. Jednotlivé vzory jsou vyobrazeny na obr. 5-5. V tab. 5-3 jsou uvedeny hodnoty poměru intenzity mezi LED vnitřního a vnějšího kruhu u druhého vzoru rozložení.



Obr. 5-5: Konfigurace LED v matici prvního vzoru rozložení (převzato z [17]).

Tab. 5-3: Poměr intenzity mezi vnitřním a vnějším kruhem tvořeným LED [17].

Vzor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Poměr	$\infty$	20,5	8,6	4,7	2,7	0	0,1	0,2	0,4	0,6



Obr. 5-4: Konfigurace LED v matici druhého vzoru rozložení (modifikováno z [17]).

Experiment byl prováděn při dvou úhlech ( $10^\circ$  a  $20^\circ$ ) nad směrem pohledu pozorovatele. Pozorovatel se napřed adaptoval 3 min na jas pozadí a poté vyčíslaval rušivé oslnění při různých podmínkách. Pozorovatel se díval na monitor, kde se mu promítaly obrázky, ale jeho periferní vidění bylo ovlivněno oslňujícím zdrojem. Každý pozorovatel provedl 100 vyhodnocení oslnění na stupnici od 1 do 7. Experimentu se účastnilo 20 pozorovatelů s průměrným věkem 23,1 let.

Z vyhodnocení experimentu bylo zjištěno, že menší velikost uniformní matice vede k většímu rušivému oslnění. Větší neuniformita uspořádání LED taktéž vede k většímu rušivému oslnění.

Rozšíření metodiky UGR pro hodnocení malých zdrojů oslnění  $UGR_{small}$  bylo porovnáno s daty získány při prováděném experimentu. Korelační koeficient  $r$  mezi hodnocením pomocí

UGR<sub>small</sub> a subjektivním hodnocením byl 0,94 a 0,85 (pro uniformní matici LED a neuniformní vzor LED).

Byl vytvořen nový model UGR, nazvaný jako UGR<sub>n1</sub>, pro vylepšení vyhodnocování svítidel tvořených z uniformních LED matic. Nový model UGR<sub>n1</sub> je dán vztahem 5.3

$$UGR_{n1} = 8 \cdot \log \left| \frac{0,25}{L_p} \sum_{i=1}^n 200 \cdot \frac{I_{s,i}^2}{r_i^2 \cdot p_i^{váha}} \right| \quad (-; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd}; \text{m}; -), \quad (5.3)$$

kde  $I_{s,i}$  je svítivost LED a další veličiny jsou stejné jako ve vztahu 2.7. Druhá mocnina činitele polohy ale byla nahrazena novým parametrem nazvaným jako váhový faktor. Váhový faktor je dán vztahem 5.4

$$váha = 2 + \frac{4}{\text{počet LED}} \quad (-). \quad (5.4)$$

Korelační koeficient  $r$  mezi hodnocením pomocí UGR<sub>n1</sub> a subjektivním hodnocením byl poté 0,96 a 0,86. Došlo tedy k malému zlepšení pro všechna vyhodnocovaná data. Nakonec byla provedena úprava vztahu (5.3) a byl definován nový vztah

$$UGR_{n2} = 8 \cdot \log \left| \frac{0,25}{L_p} \sum_{i=1}^n 200 \cdot \frac{I_{s,i}^2}{r_i^2 \cdot p_i^{váha+kontrast}} \right| \quad (-; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd}; \text{m}; -). \quad (5.5)$$

Mocnina u činitele polohy ve vztahu (5.5) uvažuje dva koeficienty. První z nich (váhový faktor) bere v potaz hodnocení svítidel, které tvoří uniformní matice složená z LED a druhý koeficient (kontrast) uvažuje hodnocení neuniformního vzoru rozložení jednotlivých LED. Vztah (5.6) udává výpočet kontrastu

$$kontrast = \frac{\sqrt{\sum (I_i - I_j)^2}}{N \cdot I_{avg}} \quad (-; \text{cd}; \text{cd}; -; \text{cd}), \quad (5.6)$$

kde  $I_i$  a  $I_j$  jsou svítivosti sousedících LED a  $N$  udává počet prvků umocněných druhou mocninou v sumě. Čím větší bude neuniformita, tím větší bude hodnota kontrastu.

Korelační koeficient  $r$  mezi hodnocením pomocí UGR<sub>n2</sub> a subjektivním hodnocením byl poté 0,96 a 0,93. Upravená metodika hodnocení UGR<sub>n2</sub> tak mnohem lépe odpovídá subjektivnímu hodnocení rušivého oslnění od zkoumaného typu světelného zdroje [17].

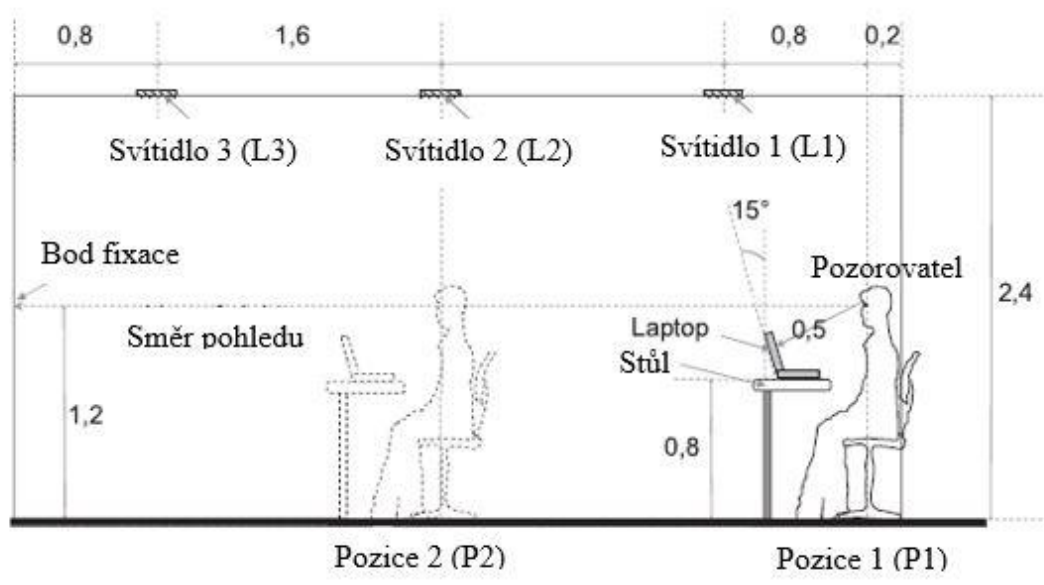
### 5.3 Komplexní vztah pro výpočet rušivého oslnění

Studie uvedená v literatuře [18] je zaměřená na úpravu metody UGR tak, aby byla použitelná pro hodnocení rušivého oslnění nezávisle na druhu použitého světelného zdroje. Experiment je založen na porovnání subjektivního hodnocení pozorovatelů s vypočtenou hodnotou UGR.

Subjektivní vyhodnocování oslnění bylo provedeno v místnosti simulující prostředí kancelářského prostoru. Rušivé oslnění bylo hodnoceno podle tab. 4-1. Místnost měla 3 stěny



a žádná okna. Rozložení a rozměry jsou na obr. 5-6. Činitel odrazu stropu a stěn byl 0,82, podlahy 0,2.



Obr. 5-6: Rozložení místnosti experimentu. Rozměry jsou uvedeny v metrech (upraveno z [18]).

V tomto experimentu bylo vyhodnocováno 20 stavů osvětlení, tvořených kombinací 5 úrovní osvětlenosti a čtyř úrovní uniformity jasu. Hodnoty těchto úrovní jsou v tab. 5-4. Osvětlenost v tabulce odpovídá horizontální osvětlenosti roviny ve výšce 0,8 m v místě P2 (viz obr. 5-6). Uniformita  $U$  je stanovena jako poměr průměrného a maximálního jasu svítidla. Průměrná a maximální hodnota jasu svítidla byla získána z jasové mapy změřené pomocí jasové kamery Konica Minolta CA-2000 pro dvojrozměrné měření jasu a barevných souřadnic světla.

Tab. 5-4: Úrovně osvětlenosti a uniformity [18].

Parametr	Úrovně				
Osvětlenost $E$ (lx)	100	300	500	750	1500
Uniformita $U$ (-)	0,01	0,07	0,4	0,8	

Bylo subjektivně vyhodnoceno oslnění způsobené popsánými stimuly. Hodnocení proběhlo v následujících krocích. Pozorovatel se nejprve adaptoval 30 sekund v tmavém prostředí, poté vstoupil do místnosti experimentu na pozici P1 a adaptoval se 30 sekund. Poté pozorovatel vyhodnotil oslnění při nepřímém pohledu a přesunul se na pozici P2, kde vyhodnotil oslnění při nepřímém pohledu a poté při přímém pohledu pro svítidla L3 a L2. Nakonec se pozorovatel vrátil na pozici P1 a vyhodnotil oslnění při přímém pohledu na svítidlo L3. Před změnou osvětlovacích podmínek se pozorovatel vrátil do tmavé místnosti. Subjektivního hodnocení oslnění se zúčastnilo 20 pozorovatelů (10 žen, 10 mužů) ve věku od 25 do 59 let. Metoda UGR je všeobecně používána k určení rušivého oslnění při nepřímém pohledu. Rušivé oslnění ovšem nastává taktéž při přímém pohledu do zdroje oslnění. Studie se tak zaměřuje na rušivé oslnění způsobené při nepřímém i přímém pohledu do zdroje oslnění.

Analýzou získaných dat studie dochází ke stejným závěrům pro přímý i nepřímý směr pohledu. S klesající uniformitou jasu svítidla se profil subjektivního hodnocení posouvá k větším hodnotám

rušivého oslnění. V této studii se taktéž ukazuje, že vypočtená hodnota UGR je nadhodnocena oproti subjektivnímu vnímání oslnění pozorovatelem. Obzvláště při vysoké jednotnosti jasu je hodnota UGR nadhodnocena více, než při větší neuniformitě jasu oslňujícího zdroje [18].

Studie předkládá modifikovaný vztah UGR metody získaný z experimentu provedeném v literatuře [19], který zohledňuje uniformitu jasu svítících částí. Nový vztah pro nepřímý pohled je definovaný jako

$$nUGR = 5,7 \cdot \log \left| \frac{0,25}{L_p} \sum_{i=1}^n \frac{L_{zi}^2 \cdot f(U_i) \cdot \Omega_i}{p_i^2} \right| \quad (-; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; -; \text{sr}; -), \quad (5.7)$$

$$f(U) = -0,07(\ln(U))^3 + 0,41 \quad (-), \quad (5.8)$$

kde  $U$  je jasová uniformita každého svítidla v zorném poli pozorovatele. Uniformita je definována jako poměr průměrné a maximální hodnoty jasu svítidla.

Data získaná ze subjektivního hodnocení byla analyzována za použití vztahů 5.7 a 5.8. Výsledek regresní analýzy ukazuje, že korelační koeficient je větší u modifikovaného vztahu 5.7 ( $r = 0,88$ ) než při výpočtu pomocí UGR ( $r = 0,79$ ). Upravená metoda nUGR je tak schopna lépe hodnotit rušivé oslnění při použití neuniformního zdroje oslnění [18].

## 5.4 Další závěry studií na rušivé oslnění od neuniformního svítidla

Studie z literatury [20] se zabývá zkoumáním rušivého oslnění způsobené LED zdroji s různou distribucí jasu. Výsledkem této studie bylo, že neuniformní distribuce vede k většímu rušení než uniformní při stejné velikosti jasu. Byl zde stanoven nový termín “efektivní jas oslnění“ ( $L_{eff}$ ) k úpravě jasu oslnění zdroje. Podle této definice má neuniformní zdroj oslnění větší  $L_{eff}$  než uniformní zdroj oslnění. Takto upravený model UGR lépe odpovídá výsledkům pro neuniformní zdroje oslnění.

Další studií zabývající se charakteristikou rušivého oslnění způsobeného LED světelným zdrojem je studie popsána v literatuře [21]. Tato studie je založena na subjektivním hodnocení oslnění od světelného zdroje použitého při experimentu. Při experimentu byl měněn poměr jasu mezi LED světlem a periferní oblastí, počet LED a jejich rozmístění. Poměr jasu je definován jako

$$L_{poměr} = \frac{L_b}{L_z} \quad (-; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}), \quad (5.9)$$

kde  $L_b$  je jas periferní oblasti a  $L_z$  je jas simulovaného LED svítidla.

Výsledky provedené studie jsou následující:

1. Rušivé oslnění může být sníženo zvýšením poměru jasu  $L_{poměr}$  blíže k hodnotě 1. Úroveň rušení může být tedy snížena rozptýlením světla čočkou nebo jiným prostředkem. Úroveň rušivého oslnění bude stejná, pokud průměrný jas světelného zdroje při poměru jasu blízkém se 0,001, je 38 % nebo 60 % (pro úhly pozorování  $0^\circ$  a  $10^\circ$ ) průměrného jasu světelného zdroje při poměru jasu rovnajícím se 1.

2. Pokud je celková plocha světelného zdroje konstantní, BCD průměrný jas narůstá se zvětšujícím se počtem LED. BCD průměrný jas vyjadřuje hodnotu jasu, která vytváří hranici mezi přijatelným a nepříjemným oslněním. To znamená, že větší počet LED v daném svítidle o stejné ploše vyzařování může snížit oslnění při zabezpečení stejné úrovně osvětlení.
3. Pokud je počet LED konstantní, BCD průměrný jas klesá se zvětšující se plochou světelného zdroje.
4. Pokud jsou rozestupy mezi LED konstantní, BCD průměrný jas klesá se zvětšující se plochou vyzařování světelného zdroje (počet LED proporcionálně narůstá se zvětšující se plochou) [21].

V literatuře [22] byl zkoumán činitel polohy pro výpočet UGR při hodnocení uniformního zdroje oslnění a LED světelného zdroje. Výsledky studie jsou shrnuty v následujících bodech:

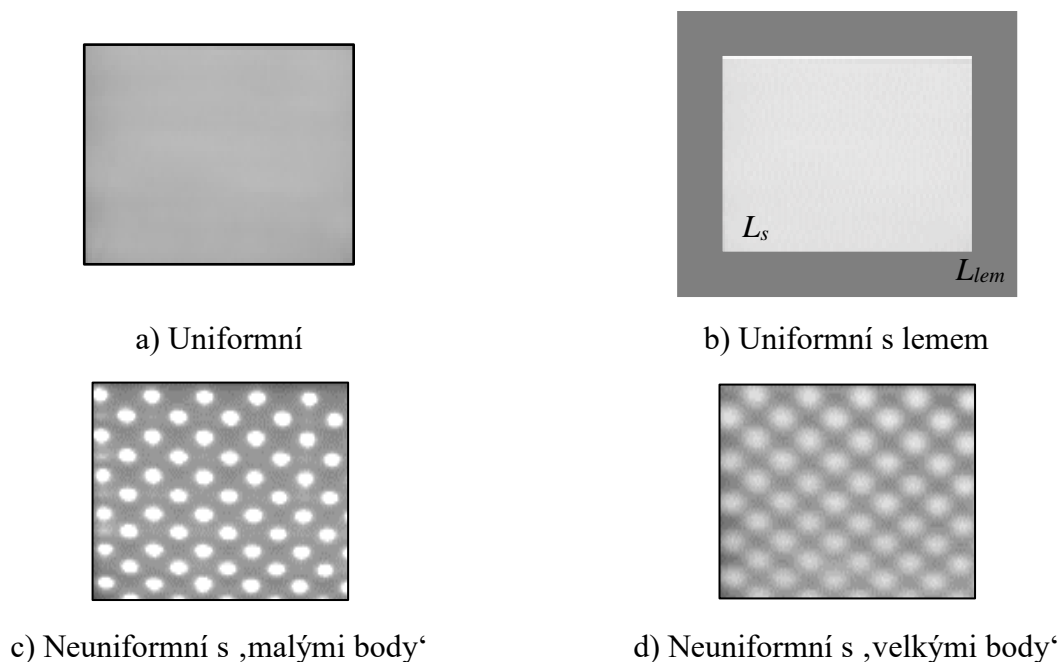
1. Při centrálním vidění, maticově uspořádaný zdroj světla způsobil větší rušivé oslnění než uniformní zdroj světla. Ale při horizontálním periferním vidění oba zdroje světla způsobovaly téměř stejné vnímání oslnění.
2. Bylo zjištěno, že svítidlo s maticí LED mělo větší činitel polohy než uniformní zdroj oslnění.
3. Je možné minimalizovat rušivé oslnění optimalizací velikosti bodů nebo intervalů mezi těmito body v maticovém uspořádání LED světelného zdroje.
4. Rušivé oslnění způsobené tímto světelným zdrojem může být vyhodnoceno metodikou UGR při použití upraveného činitele polohy [22].

Pro upravený činitel polohy dle studie [22] pak platí vztah

$$p' = \frac{BCD_{mz}}{BCD_{uz}} \quad (-; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}), \quad (5.10)$$

kde  $p'$  je upravený činitel polohy, pro použití metodiky UGR k vyhodnocení maticového zdroje světla.  $BCD_{mz}$  je jas představující hranici mezi zrakovou pohodou a rušením, v určitém úhlu nad směrem pohledu pro maticový světelný zdroj.  $BCD_{uz}$  je jas představující hranici mezi zrakovou pohodou a rušením, při úhlu  $0^\circ$  nad směrem pohledu, pro uniformní světelný zdroj.

Většina experimentálních měření na vyšetření rušivého oslnění je prováděna v laboratorních podmínkách při použití jednoho (nebo malého počtu) světelného zdroje stimulujícího oslnění. Studie uvedená v literatuře [23] se naopak zabývá rušivým oslněním v reálném prostředí kancelářského typu. Jsou zde studovány vazby mezi rušivým oslněním vnímaného zaměstnanci a parametry typickými pro LED svítidla. Mezi tyto parametry, které představují důležitou roli při návrhu LED svítidel, patří špičková hodnota jasu, kontrasty jasu a prostorové rozložení jasu na ploše vyzařování svítidla. Byly testovány stimuly oslnění od svítidel s různou plochou vyzařování znázorněnou na obr. 5-7. Svítidlo s označením ,a' bylo uvažováno jako uniformní, svítidlo ,b' bylo rozděleno na dvě nezávislé plochy vyzařování (centrální plocha vyzařování se světelným lemem). Další dvě svítidla (,c' a ,d') byly označeny jako neuniformní s různou velikostí svítících bodů plochy vyzařování.



Obr. 5-7: Plocha vyzařování použitých svítidel (upraveno z [23]).

Oslnění od uvedených typů svítidel bylo vyhodnoceno při různých podmínkách osvětlení. Byly nastavovány tři úrovně osvětlenosti v místě zrakového úkonu (350, 500 a 700 lx) a byla zde možnost měnit tvar křivky svítivosti svítidel (kosinová a hluboká).

Za uvedených podmínek osvětlení bylo subjektivně vyhodnocováno oslnění od svítidel s různou plochou vyzařování. Z výsledků subjektivního hodnocení bylo vyvozeno několik závěrů. Přijatelnost oslnění byla mnohem menší u svítidla typu ‚c‘ než u svítidla typu ‚a‘. Největší rozdíl ve vnímání oslnění mezi těmito svítidly byl pozorován při vyšších hladinách osvětlenosti (500 a 700 lx). Při osvětlenosti 350 lx bylo vnímané oslnění téměř stejné. Dále byl vyšetřován vliv tvaru křivky svítivosti. Efekt nejednotnosti plochy vyzařování na subjektivní hodnocení byl větší u kosinové křivky svítivosti než u hluboké. To může být spojeno s několika aspekty hlubokého tvaru křivky svítivosti, mezi které patří:

1. Nižší svítivost pro pozorovací úhly, které způsobují nejvíce oslnění (20-30° v popisovaném experimentu).
2. Menší špičková hodnota jasu v porovnání s kosinovou křivkou svítivosti.
3. Menší kontrast mezi špičkovou hodnotou jasu plochy vyzařování a jasnem pozadí.

Nakonec byl zkoumán vliv kontrastu jasu mezi střední plochou vyzařování a lemem svítidla ‚b‘. Kontrast jasu je tak definován podle vztahu

$$K_G = \frac{L_{lem}}{L_s} \quad (-; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}), \quad (5.11)$$

kde  $K_G$  je kontrast jasu,  $L_s$  je jas střední části svítidla a  $L_{lem}$  je jas lemu svítidla. Bylo zjištěno, že při kontrastu jasu od hodnoty  $K_G = 1$  do hodnoty  $K_G = 0,1$  nenastával žádný výrazný rozdíl v přijatelnosti oslnění mezi pozorovateli. Jen při vypnutém světelném lemu ( $K_G = 0$ ) výrazně poklesla přijatelnost oslnění mezi pozorovateli. Lze tedy konstatovat, že pro svítidla se změnou

jasu ze středu k okraji (do kontrastu  $K_G = 0,1$ ) koreluje vypočítaná hodnota UGR se subjektivním hodnocením.

Dle uvedené studie v současnosti není jasné, do jaké míry přispívá špičkový jas, kontrast jasu a prostorové rozložení jasu na ploše vyzařování svítidla k nárůstu vnímání oslnění od těchto neuniformních svítidel [23].

## 5.5 Jasová analýza

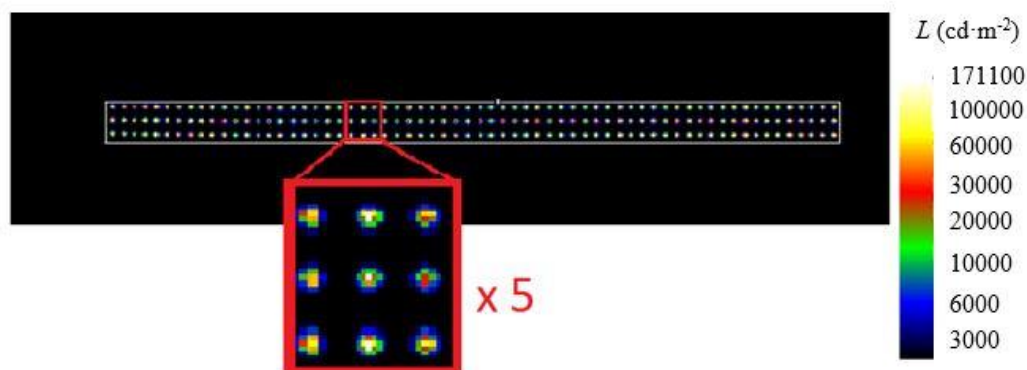
V současnosti je možné vyhodnotit oslnění dle metodiky UGR za pomoci jasového analyzátoru, který umožňuje plošné měření a následné analyzování rozložení jasu na osvětlovacích plochách nebo světelných zdrojích. Jasový analyzátor se obvykle skládá ze speciálně kalibrovaného digitálního fotoaparátu nebo kamery, jehož spektrální citlivost je přizpůsobena citlivosti lidského oka normálního fotometrického pozorovatele. Přizpůsobení ke křivce  $V(\lambda)$ , která vyjadřuje spektrální citlivost zraku, je obvykle řešeno pomocí hardwarového filtru nebo softwarově. Zpracování záznamu je následně provedeno za pomoci speciálního softwaru. Běžným výsledkem měření pomocí jasového analyzátoru je tzv. jasová mapa, která představuje plošné vyjádření hodnot jasu pomocí barevné škály (palety), tzv. pseudobarev. Určité hodnoty jasu pak odpovídají jednotlivým barvám. Z jasové mapy je tak možné snadno odečítat hodnoty jasu jednotlivých bodů.

Jedním z měřících přístrojů, které jsou schopny vyhodnotit UGR, je jasový analyzátor LDA – LumiDISP vyvíjený na VUT v Brně od roku 2001. Pro vyhodnocení oslnění je kromě jasového rozložení a prostorového úhlu potřeba určit činitel polohy jednotlivých svítidel. Prostorový úhel, pod nímž pozorovatel vidí oslňující zdroj, lze snadno odečíst z obrazu zaznamenaného na fotografii, neboť každý pixel je obrazem elementárních prostorových úhlů, jejichž sečtením získáme právě hledaný prostorový úhel. Nutnou podmínkou je znalost zobrazovací funkce objektivu, která jednoznačně popisuje pozici libovolného bodu foceně scény na pořízené digitální fotografii. Tato podmínka je nutná i při určování činitele polohy. Činitel polohy je určený podle Luckieshe a Gutha způsobem uvedeným v kapitole 2.2. Hodnota činitele polohy je dána v závislosti na umístění oslňujícího zdroje vůči ose pohledu. Toto umístění je definováno úhly  $\varphi_v$  a  $\varphi_h$  dle obr. 2-2 a tyto úhly mohou být stanoveny přímo z digitální fotografie vyhodnocované scény [24,25,26].

### 5.5.1 Výpočet UGR založený na jasové mapě pro uniformní a neuniformní typ svítidla

Studie provedená v literatuře [7] byla zaměřena na vyhodnocování UGR pomocí jasové mapy pro uniformní a neuniformní svítidla. V současnosti jsou jasové mapy snadno změřitelné a již se používají pro vyhodnocování rušivého oslnění. Díky jasové mapě ve vysokém rozlišení může být jedno svítidlo rozděleno na několik částí. Byl studován efekt výběru různých kombinací pixelů z jasové mapy a jejich vliv na vypočtenou hodnotu UGR při uvažování, že takto vybrané skupiny pixelů tvoří samostatná svítidla.

Z jasového obrazu bylo manuálně vybráno relevantní rozložení jasu od svítidla. Zvolená jasová mapa byla převedena na matici tvořenou hodnotami jasu pro pozdější analýzu. Jasová mapa



Obr. 5-8: Jasový obraz a detail jasové mapy (převzato a upraveno z [7]).

poskytuje informaci pro každý pixel. Každému pixelu je přiřazena úroveň jasu, prostorový úhel a činitel polohy. Obrázek jasové mapy je na obr. 5-8.

Bylo rozeznáváno několik algoritmů pro seskupování pixelů:

1. Pixel: Každý pixel je považován za nezávislý světelný zdroj, což vede k maximální hodnotě podskupin pro jasovou mapu.
2. Čtverec: Sousedící pixely jsou děleny do čtvercových formací.
3. Jasové seskupování: Pixely s hodnotou jasu spadající do určitého rozsahu jsou seskupovány.
4. Uniformní: Slučování pixelů vede k jedné podoblasti s průměrnou hodnotou jasu pro celou jasovou mapu.

Pro vyšetření vlivu různého dělení jasové mapy na výpočet hodnoty UGR byly použity tři uniformní a tři neuniformní svítidla.

1. Uniformní svítidla:
  - a. Lineární zářivka
  - b. LED trubice s difuzorem
  - c. LED matice s difuzorem
2. Neuniformní svítidla:
  - d. Svítidlo se 4 LED s průhlednou optikou
  - e. LED trubice s průhlednou optikou
  - f. LED matice bez použití druhotné optiky

V tab. 5-5 jsou uvedeny maximální a minimální hodnoty UGR získané z jasové mapy při použití rozdílných algoritmů seskupování pixelů. V další tabulce (tab. 5-6) jsou uvedeny hodnoty UGR založené na uniformní aproximaci jasové mapy (rozdělení na jednu podoblast), hodnoty UGR vypočtené z křivek svítivosti a hodnoty modifikované metodiky UGR pro malé světelné zdroje.

Tab. 5-5: Maximum, minimum a rozsah hodnot UGR při použití různých algoritmů seskupování pixelů [7].

	Svítlidlo	UGR <sub>MIN</sub>	UGR <sub>MAX</sub>	$\Delta$ UGR
Uniformní	Lineární zářivka	27,0	28,6	1,6
	LED trubice	22,6	24,7	2,1
	LED matice	30,3	31,2	1,1
Neuniformní	4x LED	21,5	38,8	17,3
	LED matice	23,7	35,7	12,0
	LED trubice	25,9	35,0	9,1

Tab. 5-6: UGR získané z jasové mapy, výpočtem doporučeným CIE a modifikací pro malé zdroje oslnění [7].

	Svítlidlo	UGR <sub>1</sub> podoblast	UGR	UGR <sub>small</sub>
Uniformní	Lineární zářivka	27,4	27,8	-
	LED trubice	23,1	24,4	-
	LED matice	31,1	31,5	-
Neuniformní	4x LED	21,5	25,6	25,7
	LED matice	24,3	32,0	26,8
	LED trubice	26,4	34,6	18,5

V této studii byla zkoumána spolehlivost hodnocení UGR pro různé dělení jasové mapy. Při experimentu byly použity tři uniformní a tři neuniformní svítidla. Byly porovnány hodnoty UGR získané z jasové mapy, z výpočtu křivek svítivosti a z výpočtu UGR pro malé zdroje.

Pro uniformní svítidla byly rozdíly v hodnotě UGR pro různý počet podoblastí a různý použitý algoritmus, menší než 3 UGR jednotky. Pro neuniformní svítidla byly rozdíly v závislosti na různém počtu podoblastí a použitém algoritmu větší než 9 UGR jednotek.

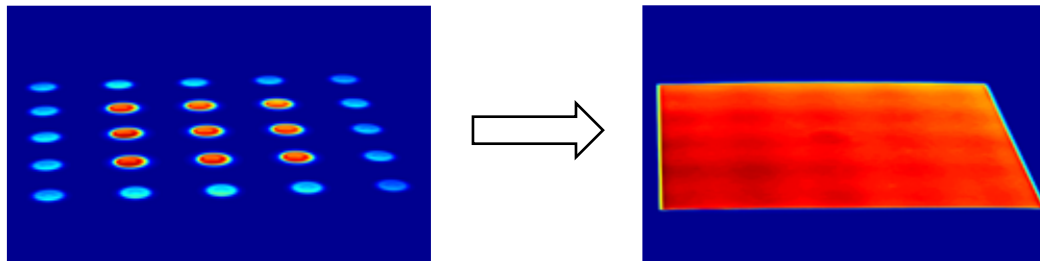
Lze tedy prohlásit, že pro uniformní světelné zdroje výpočet UGR založený na jasové mapě souhlasí s výpočtem provedeným z křivek svítivosti. Pro neuniformní svítidla hodnota UGR získaná z jasové mapy byla v širokém rozsahu hodnot, v závislosti na použitém algoritmu seskupování a počtu podoblastí. To indikuje nespolehlivost současného vztahu pro výpočet UGR s respektováním výpočtů založených na jasové mapě. Kromě toho hodnoty získané výpočtem z křivek svítivosti a upraveným vztahem pro malé zdroje oslnění neodpovídají hodnotám získaných z jasové mapy.

Je tedy nutné stanovit spolehlivou metodu pro vyhodnocování UGR za pomoci jasové mapy a také je důležité stanovit činitel oslnění, který respektuje vnímání oslnění jak od uniformního, tak neuniformního svítidla [7].

### 5.5.2 Alternativní výpočet UGR

Výpočet rušivého oslnění metodikou UGR podle vztahu 2.3 je založen na hodnotě jasu získaného jako podíl svítivosti svítidla ve směru k pozorovateli a průmětné plochy (vztah 2.6). Avšak takto získaná hodnota jasu nepodává žádné informace o prostorovém rozložení jasu uvnitř svítidla.

Dochází tak k uniformní aproximaci, kdy každý člen sumy vztahu 2.3 pro výpočet UGR představuje jedno svítidlo s jedinou hodnotou jasu. Důsledek uniformní aproximace je naznačen na obr. 5-9. Výpočet rušivého oslnění pomocí UGR je tak nevhodný pro neuniformní svítidla, jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno.

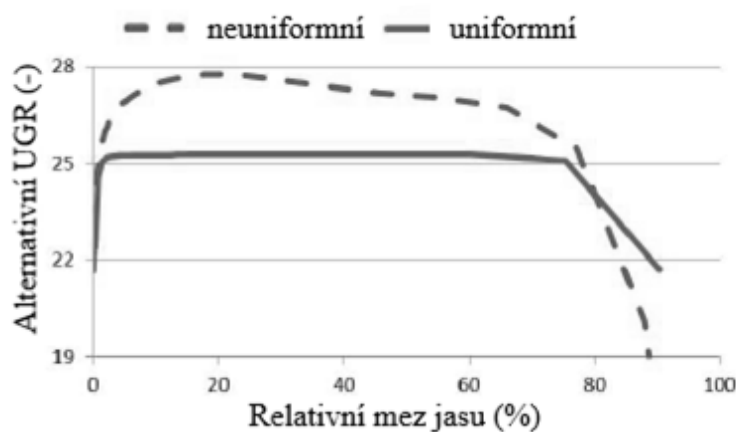


Obr. 5-9: Principiální znázornění uniformní aproximace svítidla (převzato a upraveno z [27]).

V předchozí kapitole byl popsán vliv použitého algoritmu seskupování pixelů získaných z jasové mapy svítidla na hodnotu UGR. Studie uvedená v literatuře [27] pak předkládá tzv. alternativní výpočet UGR, který je založen na jasovém seskupování pixelů. Je stanovena mezní hranice jasu, která rozlišuje mezi pixely pozadí svítidla o nízkém jasu a svítícími pixely. Každá propojená skupina svítících pixelů je následně uvažována jako samostatný světelný zdroj pro výpočet UGR. Hodnota jasu takto vytvořených samostatných světelných zdrojů je pak určena z průměrné hodnoty jasu dané vytvořené skupiny svítících pixelů. Prostorový úhel je určen součtem prostorových úhlů každého pixelu ve skupině. Činitel polohy skupiny svítících pixelů je pak určen postupem, kdy poloze každého pixelu je přiřazena určitá váha podle velikosti jasu tohoto pixelu a následně je určena průměrná poloha skupiny svítících pixelů [27].

Při alternativním výpočtu UGR je důležité správně stanovit mez jasu, který rozlišuje mezi pixely pozadí a pixely tvořící samostatné svítidlo. Je obtížné stanovit absolutní mez jasu při uvažování uniformního i neuniformního typu svítidla. Proto byla zavedena relativní hranice jasu, definovaná jako poměr absolutní hranice jasu a maximálního jasu pixelů. Vliv jasu uvažovaného svítidla má při výpočtu pomocí UGR kvadratickou závislost, zatímco vliv prostorového úhlu je lineární. Na obr. 5-10 je znázorněn vliv stanovení mezního jasu na vypočtenou hodnotu UGR. U neuniformního typu svítidla zvětšující se relativní hranice jasu vede k menším skupinám představující samostatná svítidla. To má za následek větší hodnotu průměrného jasu, a naopak menší velikost prostorového úhlu. Vliv jasu díky své kvadratické závislosti převažuje nad vlivem velikosti prostorového úhlu. Další zvyšování relativní hranice jasu vede k dalšímu zmenšování prostorového úhlu, zatímco průměrná hodnota jasu je na své maximální hodnotě, což vede k poklesu hodnoty UGR. Pro relativní hranici jasu v rozmezí od 5 % do 50 % je rozdílnost v hodnotě UGR menší než 1. Pro správné hodnoty UGR při tomto alternativním výpočtu by se tak mezní jas měl pohybovat v uvedeném rozmezí.





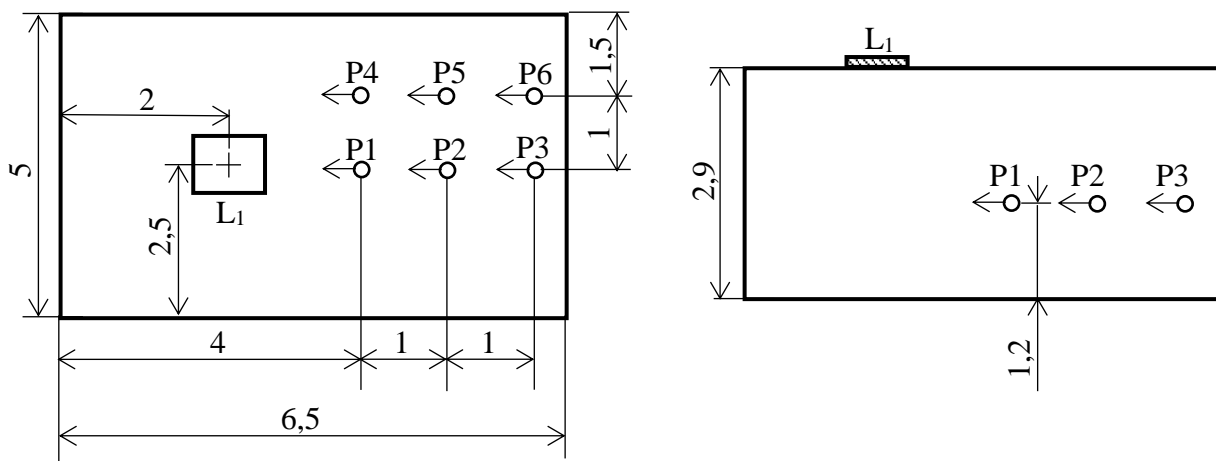
Obr. 5-10: Vliv výběru hranice jasu na hodnotu UGR (převzato a upraveno z [27]).

Alternativní způsob výpočtu UGR tak může být použit při výpočtu rušivého oslnění z jasové analýzy hodnocené scény. Z porovnání subjektivního hodnocení rušivého oslnění s původním a alternativním výpočtem vyplývá, že alternativní výpočet UGR z jasové mapy koreluje více se subjektivním hodnocením ( $R^2=0,92$ ) než při použití standardního výpočtu UGR ( $R^2=0,63$ ) [27].

## 6 MODELOVÉ SIMULACE OSLNĚNÍ

V rámci této kapitoly bylo provedeno několik vzorových simulací oslnění, s cílem ověřit a stanovit vazby mezi veličinami vstupující do výpočtu UGR při uvažování uniformního a neuniformního typu svítidla. Jednotlivé simulace byly provedeny v programu Relux, který slouží k projektování osvětlovacích soustav. Tento software je vyvíjen švýcarskou firmou Relux Informatik AG.

Za pomoci zmíněného programu je možné vypočítat hodnotu UGR hodnocené osvětlovací soustavy pro určené pozorovatele. Pozorovatel je definovaný umístěním v prostoru a směrem pohledu. Při simulaci byly použity činitele odrazu pro strop, podlahu a stěny rovnající se hodnotám 0,7, 0,4, a 0,8 v daném pořadí. Rozměry místnosti spolu s rozložením pozorovatelů a umístěním hodnoceného svítidla jsou vyznačeny na obr. 6-1.



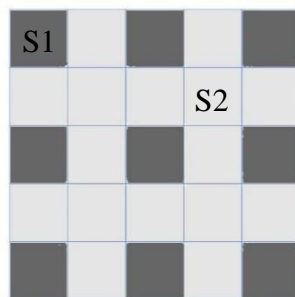
Obr. 6-1: Schematické znázornění rozměrů místnosti a rozmístění daných prvků, při prováděných simulacích (rozměry jsou uvedeny v metrech).

### 6.1 Vliv kontrastu jasu

Nejprve byl simulován vliv jednotnosti jasu svítidla na hodnotu UGR. V simulačním programu nelze nastavit prostorové rozložení jasu v rámci svítidla. Hodnocené svítidlo  $L_1$  s plochou vyzařování o rozměrech 0,5x0,5 m tak bylo sestaveno z 25 menších svítidel s plochou vyzařování 0,1x0,1 m. Elementární svítidla, která tvoří jedno velké svítidlo, byla rozdělena na dvě skupiny (S1, S2) v rozložení podle obr. 6-2. Postupně byl měněn poměr jasu mezi skupinou S1 a S2 podle tab. 6-1, při zachování stejné průměrné hodnoty jasu svítidla  $L_1$ . Poměr jasu byl vyjádřen následujícím vztahem jako

$$K_1 = \frac{L_{avg}}{L_{max}} \quad (-; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}), \quad (6.1)$$

kde  $L_{max}$  je maximální hodnota jasu a  $L_{avg}$  je průměrná hodnota jasu simulovaného svítidla.

Obr. 6-2: Rozdělení plochy vyzařování svítidla  $L_1$  při simulaci jednotnosti jasu.

Tab. 6-1: Hodnoty kontrastu jasu použitých při prováděné simulaci.

Simulace č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K_1$	0,360	0,393	0,432	0,480	0,540	0,617	0,720	0,864	0,960	1,000

Hodnoty UGR pro vyhodnocované pozice pozorovatele získané z provedené simulace jsou zapsány v tab. 6-2. Krok simulace č.1 představuje největší neuniformitu svítidla a krok č.10 uvažuje plně jednotnou plochu vyzařování svítidla. Při všech krocích simulace byla nastavena stejná velikost světelného toku ( $\Phi_{L1} = 6000 \text{ lm}$ ) svítidla  $L_1$ , kdy tento světelný tok byl rozdělován mezi elementární svítidla tak, aby vytvořil kontrasty jasu uvedené v tab. 6-1. Při této konstantní hodnotě světelného toku je uvažováno, že se nemění jas pozadí v jednotlivých simulacích. Prostorové rozložení jasu na ploše vyzařování svítidla je jediným měnícím se parametrem vstupujícím do výpočtu UGR. Z takto získaných hodnot UGR byla stanovena odchylka  $\Delta UGR$  vztahem

$$\Delta UGR_{Pi-j} = UGR_{Pi-j} - UGR_{Pi-10} \quad (-; -; -), \quad (6.2)$$

kde  $UGR_{Pi-j}$  je hodnota UGR pro i-tého pozorovatele j-té simulace,  $UGR_{Pi-10}$  je hodnota UGR pro i-tého pozorovatele 10 simulace (která představuje ideálně uniformní svítidlo) a  $\Delta UGR_{Pi-j}$  je výsledný rozdíl hodnoty UGR pro i-tého pozorovatele j-té simulace.

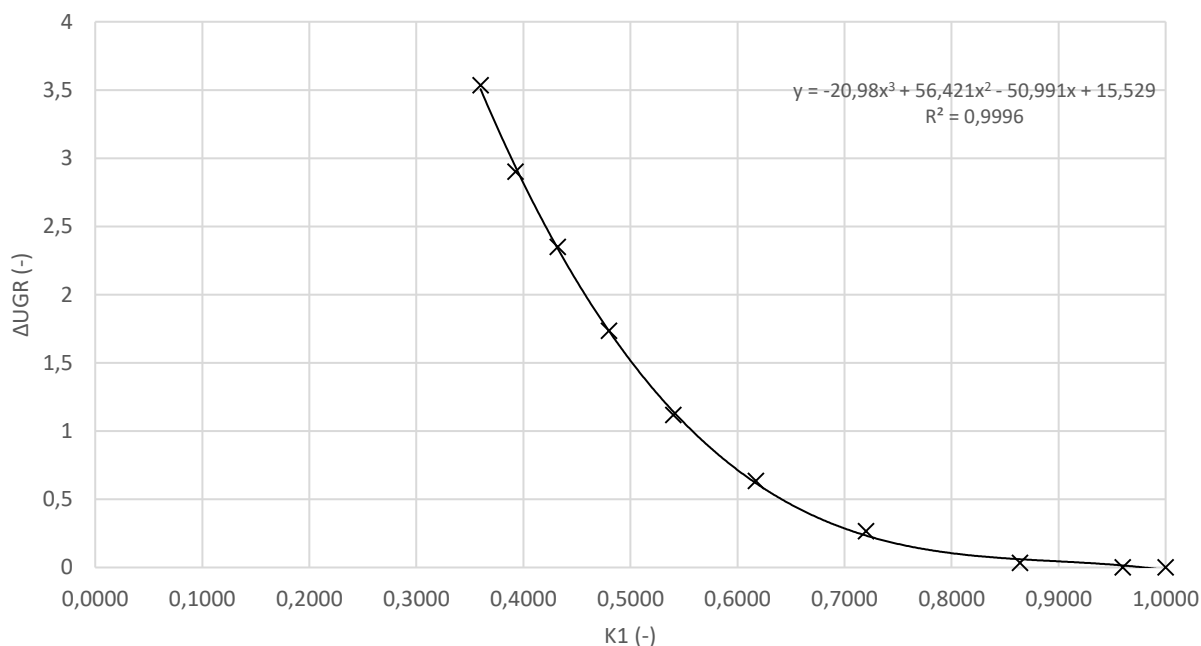
Vypočítané hodnoty  $\Delta UGR$  jsou uvedeny v tab. 6-3 spolu s průměrnou hodnotou  $\Delta UGR_{AVG}$ . Stejná hodnota  $\Delta UGR$  mezi danými pozorovateli je dána použitím vztahu 6.2, kdy je vyloučen vliv pozice pozorovatele a vyhodnocuje se pouze vliv velikosti jasu. Z dat získaných ze simulace byla vynesena grafická závislost hodnoty  $\Delta UGR_{AVG}$  na velikosti kontrastu  $K_1$  (obr. 6-3).

Tab. 6-2: Hodnota UGR pro vyhodnocované pozice pozorovatele a jednotlivé kroky simulace.

Pozice pozorovatele	Simulace č.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	UGR (-)									
P1	24,6	24,0	23,5	22,9	22,2	21,8	21,4	21,2	21,1	21,1
P2	26,0	25,2	24,7	24,1	23,5	23	22,6	22,4	22,4	22,4
P3	26,2	25,6	25,1	24,4	23,8	23,3	23,0	22,7	22,7	22,7
P4	24,4	23,8	23,2	22,6	22,0	21,5	21,2	20,9	20,9	20,9
P5	25,9	25,3	24,7	24,1	23,5	23,0	22,6	22,5	22,4	22,4
P6	26,3	25,7	25,1	24,5	23,9	23,4	23,0	22,7	22,7	22,7

Tab. 6-3: Odchylka hodnoty  $\Delta UGR$  pro vyhodnocované pozorovatele a jednotlivé kroky simulace, spolu s uvedením průměrné odchylky  $\Delta UGR_{AVG}$ .

Pozice pozorovatele	Simulace č.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$\Delta UGR$ (-)									
P1	3,5	2,9	2,4	1,8	1,1	0,7	0,3	0,1	0	0
P2	3,6	2,8	2,3	1,7	1,1	0,6	0,2	0,0	0	0
P3	3,5	2,9	2,4	1,7	1,1	0,6	0,3	0	0	0
P4	3,5	2,9	2,3	1,7	1,1	0,6	0,3	0	0	0
P5	3,5	2,9	2,3	1,7	1,1	0,6	0,2	0,1	0	0
P6	3,6	3,0	2,4	1,8	1,2	0,7	0,3	0	0	0
$\Delta UGR_{AVG}$ (-)	3,53	2,90	2,35	1,73	1,12	0,63	0,27	0,03	0,00	0,00



Obr. 6-3: Grafická závislost  $\Delta UGR_{AVG}$  na hodnotě kontrastu  $K_1$ .

Z uvedeného grafu byla stanovena rovnice regrese, díky které byl určen nový vztah pro výpočet UGR respektující prostorové rozložení jasu simulovaného svítidla jako

$$UGR_{NU1} = UGR + (-20,98 \cdot K_1^3 + 56,421 \cdot K_1^2 - 50,991 \cdot K_1 + 15,529) \quad (-; -; -;), \quad (6.3)$$

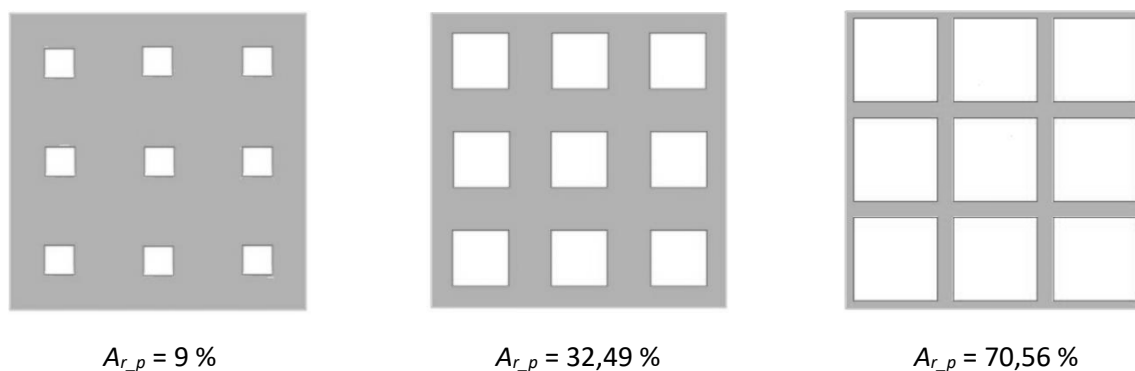
kde UGR je původní vztah (určený vztahem 2.3) a  $UGR_{NU1}$  je nově určený vztah respektující prostorové rozložení jasu simulovaného svítidla. Uvedený vztah pro výpočet UGR neuniformních svítidel ovšem není univerzální a pro jiné vstupní proměnné (tvar křivky svítivosti, velikost a rozložení plochy vyzařování), které ovlivňují simulaci, bude vztah jiný.

V provedené simulaci byl ukázán vliv kontrastu jasu na ploše vyzařování svítidla na oslnění, při diskretizaci jednoho svítidla na několik menších svítidel. Ze simulace je zřejmé, že pokud by

byly do výpočtu UGR zahrnuty i jednotlivé elementární svítící plochy (v simulaci uvažované jako svítidla skupiny S2), které ale již mají mnohem menší jas než plochy skupiny S1, nemá průměrný jas (s kterým počítá UGR) příliš vypovídající hodnotu.

## 6.2 Poměr plochy vyzařování svítidla

Dalším simulovaným parametrem byl poměr plochy vyzařování svítidla k celkové ploše svítidla  $A_{r,p}$ , vyjádřený v procentech. Simulace byla provedena v konfiguraci vyobrazené na obr. 6-1. Plocha vyzařování svítidla  $L_1$  o rozměrech 0,5x0,5 m byla rozdělena na devět elementárních plošek vyzařování, s celkovou vyzařovací plochou  $A_{r,element}$ . Příklad rozložení elementárních plošek pro vybrané poměry  $A_{r,p}$  jsou zobrazeny na obr. 6-4.



Obr. 6-4: Rozložení elementárních vyzařovacích ploch svítidla  $L_1$ .

Pro každý poměr ploch vyzařování  $A_{r,p}$  byla simulována různá úroveň jasu podle tab. 6-4. Hodnota jasu v uvedené tabulce je uvažována v kolmém směru na plošku vyzařování, určitá hodnota jasu ve směru k pozorovateli je dána vztahem 2.6. Hodnoty UGR uvedené v tab. 6-4 jsou určeny pro pozorovatele na pozici P1, kterému odpovídá činitel polohy  $p = 5,57$  (určený pro svítidlo  $L_1$ , nezohledňující plošky vyzařování).

Menší plocha vyzařování vede k celkovému menšímu prostorovému úhlu. Dle vztahu 2.3 pro výpočet UGR by tak hodnota rušivého oslnění při zachování stejné hodnoty jasu měla klesat. Z tab. 6-4 je zřejmé, že hodnota UGR se nemění v závislosti na dané hodnotě  $A_{r,p}$ , při stejné hodnotě jasu elementárních plošek vyzařování svítidla. To je způsobeno tím, že pro stejnou hodnotu jasu při zvětšování uvažované plochy vyzařování je nastavován větší světelný tok svítidla. Větší světelný tok distribuovaný svítidlem do prostoru způsobí větší hodnotu jasu pozadí  $L_p$ . Jas pozadí pro různé poměry plochy vyzařování lze jednoduše určit v programu Relux. Jas pozadí je určen výpočtem celkové osvětlenosti a přímé osvětlenosti v místě oka pozorovatele. Rozdíl těchto dvou složek osvětlenosti je nepřímá osvětlenost  $E_{nv}$ . Z nepřímé osvětlenosti v místě oka pozorovatele je pak jas pozadí určen vztahem 2.4.

Pro příklad takto získaná hodnota jasu pozadí při uvažování jasu plošek vyzařování  $L_0 = 1000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  má pro  $A_{r,p} = 9 \%$  hodnotu  $L_p = 0,337 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  a pro  $A_{r,p} = 100 \%$  má hodnotu  $L_p = 3,756 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Jas pozadí tak přímo ovlivňuje simulaci vlivu poměru ploch vyzařování svítidla.

Tab. 6-4: Hodnoty UGR pro poměr plochy vyzařování a danou hodnotu jasu.

Simulace č.	$A_{r\_element}$	$A_{r\_p}$	$L_0$ (cd·m <sup>-2</sup> )				
			1000	4000	9000	15000	23000
	(m <sup>2</sup> )	(%)	UGR (-)				
1	0,0225	9,00	14,1	18,9	21,7	23,5	25,0
2	0,0380	15,21	14,1	18,9	21,7	23,4	24,9
3	0,0576	23,04	14,1	18,9	21,7	23,4	24,9
4	0,0812	32,49	14,1	18,8	21,7	23,5	25,0
5	0,1089	43,56	14,1	18,8	21,7	23,5	24,9
6	0,1406	56,25	14,1	18,9	21,6	23,4	24,9
7	0,1764	70,56	14,0	18,8	21,7	23,5	24,9
8	0,2162	86,49	14,0	18,8	21,6	23,4	24,9
9	0,2500	100,00	14,0	18,8	21,6	23,4	24,9

Při vyhodnocení této simulace je tak vhodnější zohlednit spíše světelný tok než jas. Při návrhu osvětlení je světelný tok jedním z prvních návrhových parametrů. Při simulaci byla uvažována křivka svítivosti podle Lambertova kosinového zákona, světelný tok svítidla může být tedy vyjádřen vztahem

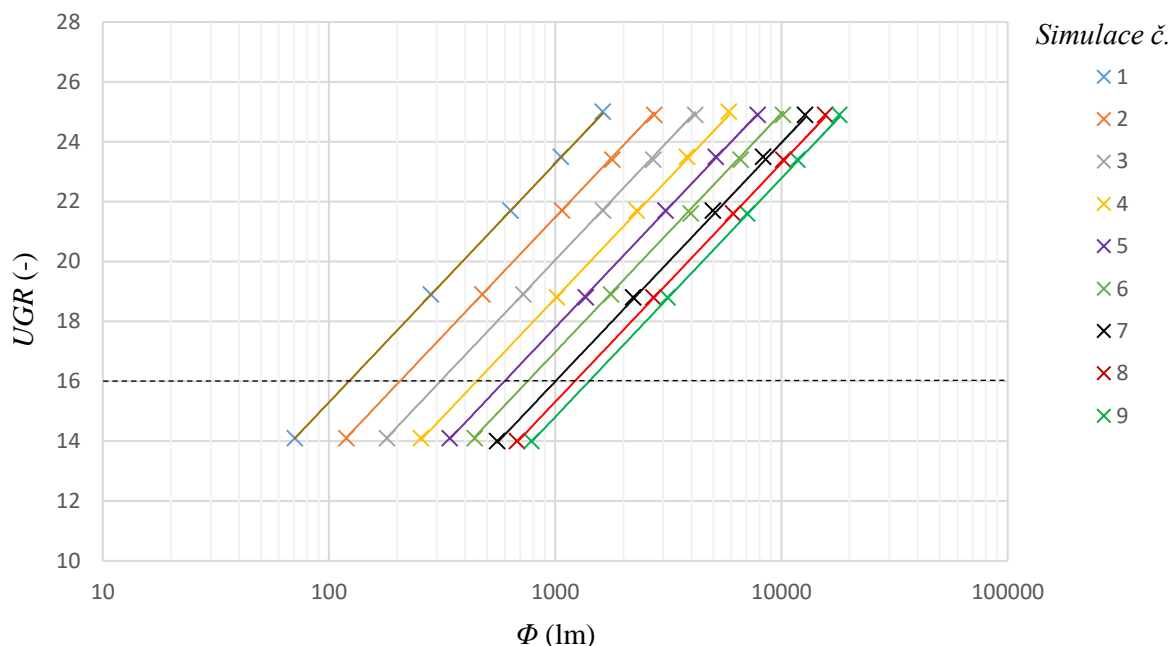
$$\Phi = L_0 \cdot \pi \cdot A_{r\_element} \quad (\text{lm; cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{m}^2), \quad (6.4)$$

kde  $\Phi$  je světelný tok simulovaného svítidla,  $L_0$  je jas a  $A_{r\_element}$  je celková plocha vyzařování jednotlivých elementárních plošek.

Hodnoty světelného toku pro uvažované úrovně jasu a jednotlivé poměry plochy vyzařování jsou uvedeny v příloze B. Na obr. 6-5 je grafické znázornění závislosti tohoto světelného toku na hodnotě UGR pro všechny kroky simulace. Aproximační křivky závislosti hodnoty UGR na světelném toku mohou být obecně popsány funkcí

$$y = k \cdot \ln(x) - b \quad (6.5)$$

kde  $y$  je hodnota UGR,  $x$  představuje světelný tok  $\Phi$  a parametry  $k$  a  $b$  závisí na poměru plochy vyzařování.



Obr. 6-5: Závislost hodnoty UGR na světelném toku pro různé poměry plochy vyzařování.

Jelikož parametr  $k$  byl téměř identický pro všechny křivky provedených simulací, byla provedena aproximace pro stanovení jeho konstantní hodnoty ( $k = 3,46$ ) a upravení parametru  $b$ . Graf na obr. 5-6 je vykreslen po popsáních úpravách parametrů  $k$  a  $b$ . Se změnou poměru plochy vyzařování se tak mění pouze parametr  $b$  podle tab. 6-5.

Tab. 6-5: Parametr  $b$  pro daný poměr plochy vyzařování.

$A_{r,p}(\%)$	9	15,21	23,04	32,49	43,56	56,25	70,56	86,49	100
$b(-)$	0,656	2,450	3,879	5,159	6,137	6,952	7,937	8,617	9,122

Na obr. 6-5 je vyznačena hranice pro hodnotu  $UGR = 16$ , což představuje stav oslnění klasifikovaný jako právě znatelné. Z uvedeného grafu lze snadno stanovit minimální hodnotu poměru  $A_{r,p}$  pro daný světelný tok tak, aby rušivé oslnění nepřesáhlo vyznačenou mezní hodnotu UGR. Při určitém poměru  $A_{r,p}$  může být stanovena maximální hodnota světelného toku, při kterém hodnota UGR nepřesáhne definovanou mez.

Provedená simulace a zpracování výsledků tak přehledně ukazuje vlivy uvažovaného jasu, světelného toku a poměru plochy vyzařování na velikost rušivého oslnění. Je zde ale potřeba zdůraznit, že vyvozené výsledky neslouží k použití pro všeobecný model predikce oslnění, jelikož byly odvozeny ze simulace o daných vstupních proměnných (typ svítidla, činitel polohy atd.).

Pokud se dvě uvažovaná svítidla určitého typu liší pouze ve velikosti plochy vyzařování, lze mezi jejich vypočítanými hodnotami UGR stanovit vztah 6.6 jako

$$UGR(A_{r1}) = UGR(A_{r2}) - 8 \cdot \log\left(\frac{A_{r1}}{A_{r2}}\right) \quad (-; m^2; m^2), \quad (6.6)$$

kde  $A_{r1}$  a  $A_{r2}$  jsou plochy vyzařování uvažovaných svítidel.

Vztah 6.6 a provedená simulace popisují vliv plochy vyzařování na rušivé oslnění vyhodnocované pomocí metodiky UGR, ale nezohledňují možný vliv prostorového rozložení elementárních plošek vyzařování na subjektivní vnímání oslnění. Studie v literatuře [28] provedla experimentální měření na vliv poměru a rozložení plochy vyzařování na subjektivní hodnocení oslnění. Závěry studie ukazují, že při přímém pohledu do zdroje oslnění nemá poměr plochy vyzařování větší vliv na subjektivní vnímání rušivého oslnění, při uvažování stejného jasu oslňujícího zdroje. Tento závěr byl ale vyvozen z měření testovaného svítidla o rozložení plochy vyzařování vyobrazené na obr. 6-4 pro svítidla s jinou neuniformitou mohou být vlivy na subjektivní vnímání oslnění jiné.



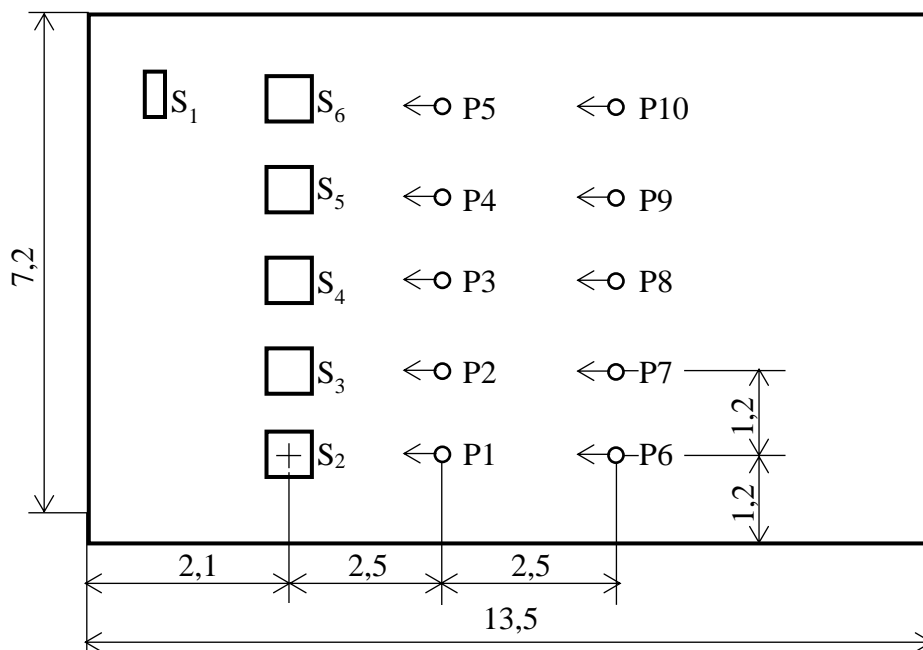
## 7 POKUSNÉ MĚŘENÍ

Cílem tohoto experimentu bylo ověřit robustnost metodiky vyhodnocování oslnění pomocí UGR od svítidel s neuniformní plochou vyzařování. Určení oslnění od testovaných svítidel bylo provedeno ve dvou krocích, kdy nejprve byl experiment nasimulován v programu Relux a následně bylo oslnění vyhodnoceno pomocí jasového analyzátoru.

Vlastní měření bylo zaměřeno na zkoumání vlivu velikosti plochy vyzařování svítidla. Na neuniformitu svítidla je tedy nahlíženo ve smyslu různého rozložení elementárních plošek vyzařování o různé velikosti tvořící celkovou plochu vyzařování vyhodnocovaného svítidla.

### 7.1 Místnost měření a testovaná svítidla

Pokusné měření bylo provedeno v učebně SA6.33 v budově T12 VUT v Brně. Rozměry dané učebny jsou (ŠxDxV) 7,2x13,5x2,9 m. Pro možnost opakování měření a provedení simulace nebo subjektivního hodnocení, bylo potřebné měřenou místnost přesně vyměřit a určit přesnou polohu objektů a svítidel. Ze změřených rozměrů byla místnost měření vymodelována v programu Relux. Zachycení reálné scény místnosti měření spolu s rendrem ze zmíněného programu je vyobrazeno v příloze C. Na obr. 7-1 jsou vyznačeny základní rozměry v metrech určující rozmístění testovaných svítidel a jednotlivých pozorovatelů.



Obr. 7-1: Rozmístění testovaných svítidel spolu s body ve kterých se oslnění vyhodnocuje.

Hodnocení oslnění bylo provedeno pro 5 stropních vestavných svítidel s označením S2 až S6, která byla instalována do místnosti experimentu na pozice uvedené na obr. 7-1. Svítidlo S1 bylo volně umístěno na podlaze a je určeno pro vytváření adaptačního jasu pozadí při subjektivním hodnocení. V průběhu samotného experimentu bylo svítidlo S1 ve vypnutém stavu.

Použitá svítidla o rozměrech 0,6x0,6 m byla typu LED s laditelnou teplotou chromatičnosti. Plocha vyzařování těchto svítidel je tvořena součtem elementárních ploch uspořádaných v určitém rastru. Popis velikosti a rozložení plochy vyzařování a parametry jednotlivých svítidel jsou

uvedeny v tab. 7-1 a tab. 7-2. Schematický náčrtek masek svítidel s jejich rozměry je uveden v příloze D.

Tab. 7-1: Velikost a rastr plochy vyzařování použitých svítidel při pokusném měření.

Označení svítidla	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Rozložení plochy vyzařování	1x1	1x1	2x2	4x4	7x7	17x17
Celková plocha vyzařování $A_r$ (m <sup>2</sup> )	0,25	0,25	0,16	0,1681	0,1225	0,1156

Tab. 7-2: Parametry společné pro všechna použitá svítidla.

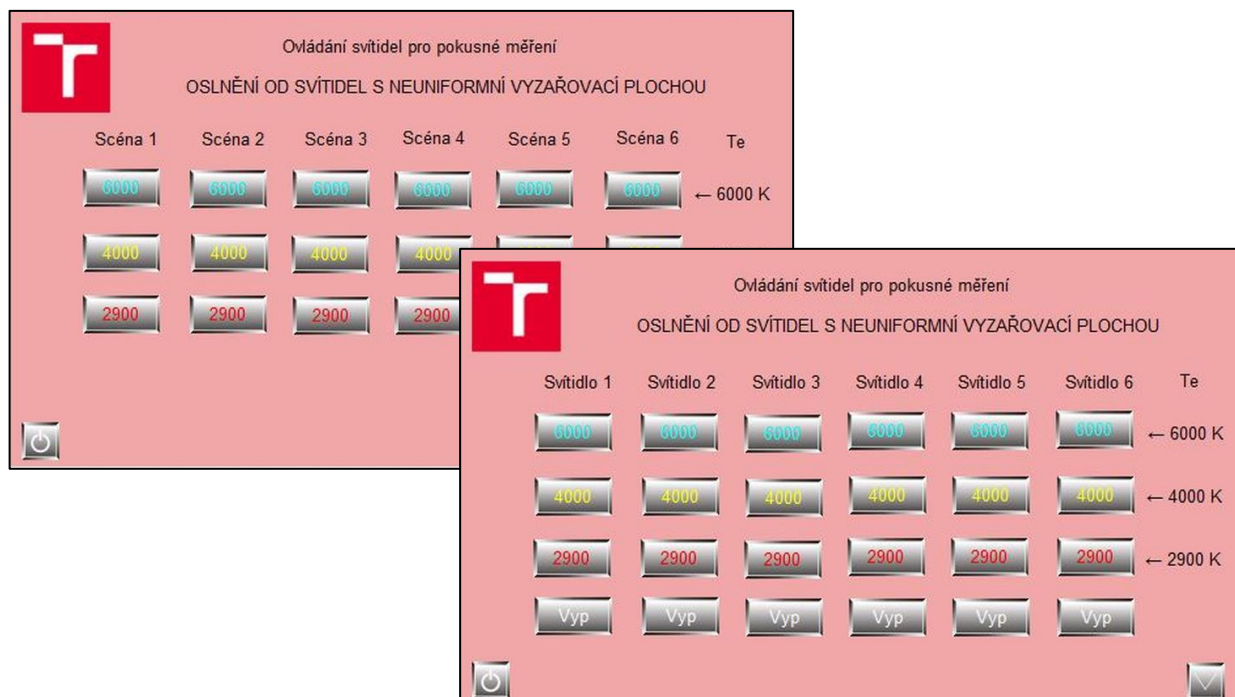
Typ svítidla	$\Phi$	$R_a$	Tvar křivky svítivosti
(-)	(lm)	(-)	(-)
LED s laditelnou bílou	6283	80	kosinová

Jednotlivá svítidla obsahují tři stmívatelné předřadníky LL60/2-E-DA-iC od fy Helvar o výstupním výkonu 60 W [29]. Uvedený předřadník má k dispozici 2 kanály pro připojení LED modulů. Na každý kanál jsou připojeny LED moduly VYRTYCH 280x24/32, které jsou osazeny LED typu LM561B+ o různé teplotě chromatičnosti, tím je dosažena možnost laditelné bílé.

Řízení svítidel bylo provedeno pomocí systému DALI. Jedná se o systém řízení osvětlení s centrální řídicí jednotkou, která komunikuje se svítidly po DALI sběrnici. DALI sběrnice je digitální sběrnice, v tomto prováděném měření byla vedena samostatným dvoužilovým kabelem paralelně propojujícím všechna měřená svítidla, přičemž na polaritě vodičů nezáleží. Jako řídicí člen sběrnice byl použit směrovač Imagine Router 920 od fy Helvar. Komunikace se směrovačem byla provedena pomocí ethernetového rozhraní. Pro programování a konfiguraci tohoto směrovače byl využit program Designer [30]. Pomocí tohoto programu bylo možné předřadníkům přiřadit adresu a rozdělit je do skupin a nastavovat jim scény. Celkem bylo vytvořeno šest skupin reprezentující testovaná svítidla v tomto měření.

Pro potřeby měření bylo pomocí programu TouchStudio (dostupného z [31]) vytvořeno grafické uživatelské rozhraní umožňující ovládání testovaných svítidel. Byla zde možnost ovládat každé svítidlo samostatně a nastavovat tři úrovně teploty chromatičnosti (2900, 4000 a 6000 K). Také zde byly vytvořeny scény pro hromadné ovládání svítidel, kdy se zapíná pouze jedno svítidlo a ostatní svítidla se vypnou. Vytvořené grafické rozhraní je na obr. 7-2.

Intenzita svítidel S2 až S6 byla nastavena tak, aby v bodě umístěném pod středem každého svítidla ve výšce 0,75 m nad zemí byla osvětlenost 350 lx. Osvětlenost v těchto bodech byla změřena přesným laboratorním luxmetrem typu PRC Krochmann RadioLux 111. Za pomoci chromametru Konica Minolta CL-200 byla taktéž přesně nastavena teplota chromatičnosti svítidel (2900, 4000 a 6000 K).



Obr. 7-2: Grafické uživatelské rozhraní pro ovládání svítidel.

## 7.2 Simulace experimentu

Před praktickým měřením oslnění bylo pokusné měření nasimulováno v programu Relux. Vyměření a namodelování měřené místnosti bylo popsáno v předchozí kapitole. Při simulaci místnosti byly zvoleny následující činitele odrazu povrchů, v doporučeném rozsahu dle normy ČSN EN 12464-1 uvedené v literatuře [5], pro

- strop - 0,7,
- stěny - 0,75,
- podlahu - 0,4.

Dle obr. 7-1 byli v simulačním programu definováni pozorovatelé pro hodnocení oslnění podle UGR. Výška pozorovatelů byla 1,2 m nad zemí a směr pohledu byl veden vodorovně před sebe na fixační bod umístěný taktéž 1,2 m nad zemí.

Hlavním cílem provedených simulací oslnění bylo ověření vlivu různého zadávání svítících ploch svítidla, jako vstupního parametru pro výpočet UGR. Plocha vyzařování svítidla je definována v souboru fotometrických dat. Nejrozšířenější formát souboru fotometrických dat v Evropě je Eulumdat s příponou názvu souboru „.ldt“. Při hodnocení oslnění jsou výchozím podkladem jasy oslňujících zdrojů. Ty se prakticky určí pomocí zjednodušeného výpočtu jasu průměrných ploch ze známých hodnot svítivosti v daném směru. Formát Eulumdat ale používá jen velice omezenou strukturu pěti základních vyzařovacích ploch a při komplikovaných tvarech svítidel je toto nevyhovující [32]. Zmíněné omezení se neprojeví při popisu použitých svítidel ve vlastním pokusném měření, kdy je dostačující jedna plocha vyzařování. Definování rozložení jednotlivých svítících plošek na uvažované ploše vyzařování ale není možné.

Do simulačního programu byly importovány „.ldt“ soubory testovaných svítidel a tyto soubory byly upraveny tak, aby obsažená data odpovídala reálnému nastavení svítidel. V simulačním programu tak byla vypočtena stejná osvětlenost 350 lx, vyhodnocovaná ve stejném místě popsaném v předchozí kapitole popisu svítidel.

V prvním kroku simulace pokusného měření bylo oslnění vyhodnoceno při uvažování jedné svítící plochy umístěné ve středu plochy vyzařování svítidla. Velikost svítící plochy svítidel je uvedena v tab. 7-2. Postupně byla zapínána jednotlivá svítidla S2 až S6 (při vypnutém svítidle S1) a bylo vyhodnoceno oslnění pro jednotlivé pozice pozorovatelů.

V dalším kroku byla jednotlivá svítidla z prvního kroku simulace rozdělena na skupinu samostatných svítidel, podle nákresu masek svítidel uvedených v příloze D. Taktéž světelný tok svítidel z první simulace byl rovnoměrně rozdělen mezi tato samostatná svítidla.

Výsledné hodnoty UGR z provedených simulací jsou uvedeny v příloze E1. Data získaná ze simulací byla navzájem porovnána vztahem 7.1 a výsledný rozdíl je uveden v příloze E2.

$$\Delta UGR_{Si-j} = UGR_{JP_{Si-j}} - UGR_{RP_{Si-j}} \quad (-; -; -), \quad (7.1)$$

kde  $\Delta UGR_{Si-j}$  je rozdíl v hodnotě UGR pro i-té svítidlo j-tého pozorovatele,  $UGR_{JP_{Si-j}}$  je hodnota UGR pro i-té svítidlo j-tého pozorovatele při uvažování jedné svítící plochy a  $UGR_{RP_{Si-j}}$  je hodnota UGR pro i-té svítidlo j-tého pozorovatele při uvažování rozdělené svítící plochy.

### 7.2.1 Zhodnocení simulace experimentu

Na základě vyhodnocených dat z provedených simulací je možné konstatovat, že spojení dílčích svítících ploch (na povrchu plochy vyzařování svítidel použitých v této simulaci) do jedné svítící plochy nemá téměř žádný vliv na velikost UGR. Při výpočtu UGR za pomoci programu Relux byla taktéž pozorována jistá nepřesnost ve výpočetním algoritmu oslnění. Při opakování výpočtu oslnění, za nezměněných vstupních proměnných, byla vypočtena pokaždé jiná hodnota UGR lišící se o 0,1 UGR jednotky. Rozdílnost v hodnotách UGR v provedených simulacích může být způsobena touto nepřesností. Výpočet s jednou svítící plochou tedy nevede k chybnému stanovení UGR. Větší rozdíl v hodnotě oslnění by ale mohl nastat, pokud by se do svítící plochy zahrnula i plocha mřížky tvořící masku svítidla. To by vedlo ke zvětšení svítící plochy a dle vztahu 6.6 k menší hodnotě UGR, ve skutečnosti by ale svítidlo způsobovalo větší oslnění.

## 7.3 Jasová analýza

Po provedení simulace bylo přistoupeno k samotnému praktickému měření oslnění za pomoci jasového analyzátoru LDA – LumiDISP. Základní popis tohoto jasového analyzátoru byl proveden v kapitole 5.5. Měření bylo provedeno pro teplotu chromatičnosti svítidel  $T_e = 6000$  K.

### 7.3.1 Příprava a postup měření

Před provedením jasové analýzy bylo nejprve nutné přesně vyznačit polohu vyhodnocovacích bodů oslnění, fixačních bodů a rozmístit objekty v místnosti (stoly, židle) tak, aby měřená místnost

přesně odpovídala provedené simulaci. Toho bylo dosaženo za pomoci přesného samonivelačního křížového laseru a laserového dálkoměru.

V průběhu celého měření bylo potřebné vyloučit příspěvek denního osvětlení, aby nedošlo k ovlivnění samotného měření. Použití venkovních a vnitřních žaluzií bylo dostačující pro vyloučení denního osvětlení, žádné přidavné zatemnění tak nebylo použito.

Jako měřicího fotoaparátu ve funkci jasového analyzátoru byla použita digitální zrcadlovka Nikon D7200. Pro zachycení vyhodnocované scény byly použity dva typy objektivu. Pro zachycení celého poloprostoru byl použit typ širokoúhlého objektivu tzv. rybí oko. Pro detailnější vyhodnocení jasu testovaných svítidel byl pak použit objektiv 50 mm. Digitální fotoaparát byl umístěn na stativ s panoramatickou hlavou do stanovené výšky 1,2 m nad zemí. Panoramatická hlava umožnila nastavit sestavu fotoaparátu a objektivu tak, aby rotovala kolem tzv. nodálního bodu. Tím je zajištěno správné vyhodnocení jasu z detailního snímku testovaného svítidla.

Takto nastavená měřicí sestava byla postupně umísťována na místa pozorovatelů. V každém měřicím bodě bylo pořízeno několik snímků. Nejprve byla postupně jednotlivá svítidla zachycena širokoúhlým objektivem s různou dobou expozice (5, 2, 1, 1/2, 1/10, 1/20, 1/50, 1/100, 1/200, 1/500 a 1/1000 s). Poté byly pořízeny snímky s objektivem 50 mm s expozičními časy 1/10, 1/50, 1/100, 1/500 a 1/100 s. Po nasnímání všech svítidel byla měřicí sestava přemístěna na další měřicí bod. Výstupem měření tak bylo 850 snímků uložených ve formátu RAW, které byly následně zpracovány v programu LumiDISP.

### 7.3.2 Zpracování a vyhodnocení naměřených dat

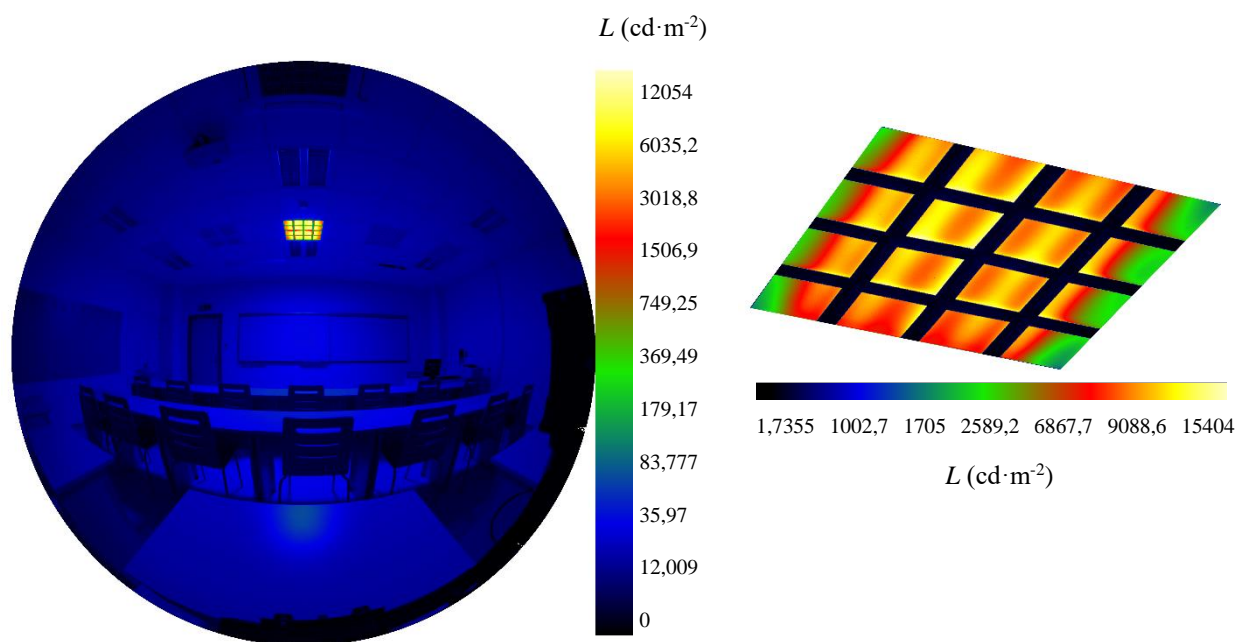
Z detailních snímků svítidel pořízených objektivem 50 mm byly vybrány snímky s takovým expozičním režimem, aby snímací čip digitálního fotoaparátu byl správně vybuzen a nedocházelo k jeho saturaci. Tyto vybrané fotografie pak byly společně se všemi snímky pořízenými širokoúhlým objektivem přetransformovány na jasové mapy.

Z jasových map pro scénu zachycenou rybím okem byla vytvořena tzv. HDR fotografie pro každou pozici a všechna svítidla. HDR fotografie je snímek s vysokým dynamickým rozsahem jasu. Při nejkratší expozici byly zachyceny nejjasnější prvky v prostoru a při delší expozici byly zachyceny méně jasné prvky. Výsledná HDR fotografie je pak vytvořena složením všech snímků s různou expozicí do jednoho, který tak pokrývá celý dynamický rozsah zaznamenané scény [33]. Ukázka HDR fotografie je na obr. 7-3 spolu s jasovou mapou detailního snímku svítidla.

Po vytvoření HDR snímků bylo přistoupeno k samotné analýze oslnění pomocí UGR. Pro provedení analýzy oslnění bylo potřeba vymezit hodnocené svítidlo. V HDR snímku bylo pomocí objektu typu polygon manuálně vybráno hodnocené svítidlo a pomocí funkce vymezení svítidel byly vybrány svítící plochy o jasu větším než  $500 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Výsledné hodnoty z analýzy jsou uvedeny v tabulce v příloze F. V této tabulce jsou taktéž uvedeny průměrné hodnoty jasu z detailního snímku svítidel, které byly odečteny pomocí histogramu, hodnota UGR vypočtená pomocí programu Relux při uvažování rozdělení svítící plochy a poměrná chyba stanovená jako

$$\delta_{\%UGR_{i-j}} = \frac{UGR_{RP_{Si-j}} - UGR_{50mm_{i-j}}}{UGR_{50mm_{i-j}}} \cdot 100 \quad (\%; -; -; -), \quad (7.2)$$

kde  $\delta_{\%UGR_{i-j}}$  je poměrná chyba pro i-té svítidlo j-tého pozorovatele,  $UGR_{RP_{Si-j}}$  je hodnota UGR pro i-té svítidlo j-tého pozorovatele ze simulace a  $UGR_{50mm_{i-j}}$  je hodnota UGR pro i-té svítidlo j-tého pozorovatele získaná z měření.



Obr. 7-3: HDR snímek pro pozici P3 a svítidlo S4 (vlevo) a jasová mapa detailního snímku svítidla S4 (vpravo).

Z uvedené tabulky v příloze F je možné vyvodit několik závěrů. Je zde přehledně vidět rozdíl mezi průměrným jasnem svítidla získaným ze zpracovaného snímku širokoúhlého objektivu a z detailního snímku. Nejmenší rozdíl v těchto průměrných jasech je pro svítidlo S2, tedy pro svítidlo o jedné svítící ploše. Pro další svítidla je rozdíl v jasech oslňujících zdrojů i dvojnásobný. To je dáno tím, že pro scénu zachycenou širokoúhlým objektivem nese informaci o hodnotě jasu oslňujícího svítidla méně zobrazovacích bodů než u detailního snímku. Průměrná hodnota jasu získaná ze snímku pořízeným normálním objektivem je tak přesnější a bude s ní dále počítáno.

Změřené hodnoty oslnění jsou taktéž v souladu s teoretickými poznatky o vlivu oslňujícího zdroje umístěného v zorném poli pozorovatele. Pro prvních pět pozic pozorovatelů platí, že se vzdalujícím se testovaným svítidlem od optické osy vidění klesá hodnota UGR. Ve druhé řadě pozorovatelů je pak obecně vyhodnocováno větší oslnění než v první řadě pozic pozorovatelů, přestože je jas zdroje oslnění ve směru k těmto pozorovatelům menší než k první řadě pozorovatelů. To je dáno tím, že oslňující zdroj je blíže ose vidění a také je zde průměrně menší jas pozadí. Dále mohou být jednotlivá svítidla porovnána vůči sobě při uvažování stejné pozice vůči testovanému svítidlu (svítidlo S2 je hodnoceno z pozice P1, S3 z P2 atd.). Při zabezpečení stejné osvětlenosti je předpokládáno, že bude nejvíce oslňující testované svítidlo S6 s nejmenší svítící plochou. Nejvíce oslnění ale způsobovalo svítidlo S5, což je způsobeno blízkostí boční stěny

měřicí místnosti k svítidlu S6, kdy pro vytvoření osvětlenosti 350 lx ve vyhodnocovaném bodě bylo svítidlo S6 více stmíváno než svítidlo S5.

### 7.3.3 Porovnání naměřených dat se simulací

Hodnota UGR z měření byla porovnána s hodnotou UGR ze simulace měření podle vztahu 7.2. Tato poměrná chyba vyjádřená v procentech se pohybuje od 0,59 % do 39,65 %. Z určené chyby mezi hodnotami UGR lze vysledovat jistý trend, kdy pro pozice vzdalující se od hodnoceného svítidla narůstá také tato chyba. Pro zjištění proměnné způsobující tuto chybu bylo vybráno měření s největší chybou, tedy hodnocení svítidla S2 z pozice P5. Tab. 7-3 shrnuje hodnoty získané z měření a vypočtené hodnoty.

Nejprve byl ověřen činitel polohy  $p$ . Z rozměrů uvedených v tab. 7-3 byl činitel polohy odečten postupem uvedeným v kapitole 2.2. Vypočtený činitel polohy odpovídá činiteli polohy získaného z měření. Pro výpočet jas oslňujícího zdroje byla vypočtena vzdálenost mezi středem oslňující plochy tohoto zdroje a okem pozorovatele podle vztahu

$$r = \sqrt{l^2 + a^2 + h^2} = \sqrt{2,5^2 + 4,8^2 + 1,7^2} = 5,6733 \text{ m} \quad (\text{m; m; m; m}), \quad (7.3)$$

kde  $a$  je boční vzdálenost oslňujícího zdroje od vertikální roviny proložené osou pohledu,  $h$  značí výšku oslňujícího zdroje nad vodorovnou rovinou proloženou osou pohledu a  $l$  vyjadřuje vzdálenost oka pozorovatele od roviny proložené oslňujícím zdrojem kolmo k ose pohledu. V simulačním programu byla jednoduše odečtena svítivost svítidla ve směru k očím pozorovatele  $I_\gamma = 410 \text{ cd}$  na pozici P5, jas oslňujícího zdroje pak bude podle vztahu 2.6

$$L_{z\_relux} = \frac{I_\gamma}{A_p} = \frac{I_\gamma}{A_{r\_S2} \cdot \cos\gamma} = \frac{I_\gamma}{A_{r\_S2} \cdot \frac{h}{r}} = \frac{410}{0,25 \cdot \frac{1,7}{5,673}} = 5473 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$$

kde  $A_{r\_S2}$  je velikost svítící plochy svítidla S2. Prostorový úhel bude podle 2.5

$$\Omega_{vyp} = \frac{A_p}{r^2} = \frac{A_{r\_S2} \cdot h}{r^3} = \frac{0,25 \cdot 1,7}{5,673^3} = 0,00233 \text{ sr}$$

Ze simulačního programu lze také obdržet jas pozadí. Nejprve byla vypočítána celková osvětlenost v místě oka pozorovatele  $E_c = 17,5 \text{ lx}$  a poté přímá osvětlenost  $E_p = 5,67 \text{ lx}$ , z těchto osvětleností může být stanovena nepřímá osvětlenost a vztahem 2.4 je dán jas pozadí

$$L_{p\_relux} = \frac{E_{nv}}{\pi} = \frac{E_c - E_p}{\pi} = \frac{17,5 - 5,67}{\pi} = 3,773 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$$

Tab. 7-3: Naměřené a vypočtené hodnoty pro výpočet oslnění podle UGR.

Hodnoty z měření				Vypočítané hodnoty a hodnoty ze simulace									
$L_{z50mm}$	$L_p$	$\Omega$	$p$	$L_{z\_relux}$	$L_{p\_relux}$	$r$	$l$	$a$	$h$	$a/l$	$h/l$	$\Omega_{vyp}$	$p_{vyp}$
( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	(sr)	(-)	( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	(m)	(m)	(m)	(m)	(-)	(-)	(sr)	(-)
4044	7,68	0,00253	6,77	5459	3,773	5,673	2,5	4,8	1,7	1,92	0,68	0,00233	6,8

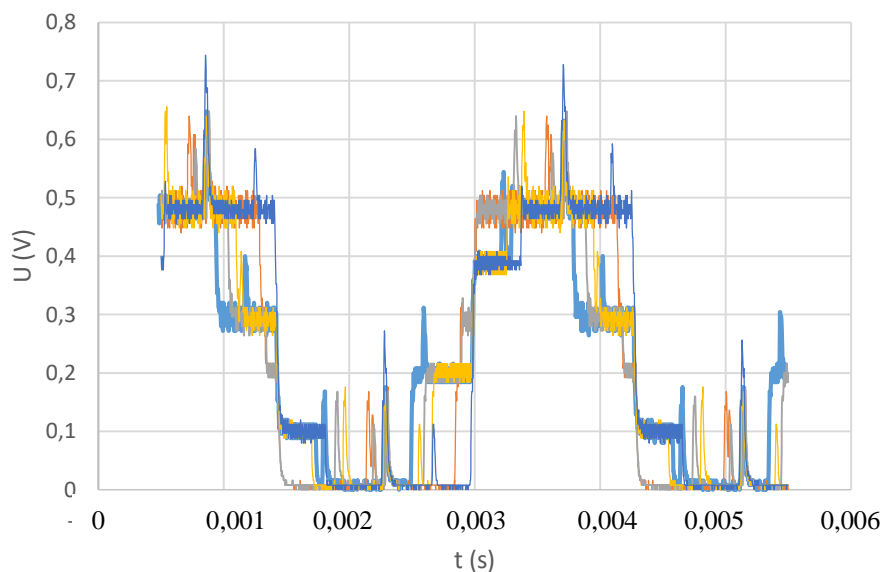
Z tab. 7-3 je zřejmé, že vypočtený jas  $L_{z\_relux}$  svítidla S2 ve směru k pozorovateli a jas pozadí  $L_{p\_relux}$  neodpovídá změřeným hodnotám. Hodnota UGR při uvažování vypočtených hodnot bude podle vztahu 2.3 pro  $n = 1$

$$UGR_{vyp} = 8 \cdot \log \left| \frac{0,25}{L_{p\_relux}} \sum_{i=1}^1 \frac{L_{z\_reluxi}^2 \cdot \Omega_i}{p_i^2} \right| = 8 \cdot \log \left| \frac{0,25}{3,773} \cdot \frac{5473^2 \cdot 0,00233}{6,8^2} \right| = 16$$

Vypočítaná hodnota  $UGR_{vyp} = 16$  přibližně odpovídá hodnotě obdržené ze simulace, která se rovná  $UGR_{RP\_S2} = 16,2$ . Předchozím výpočtem tak byla ověřena správnost postupu určení jasu oslňujícího zdroje a jasu pozadí ze simulačního programu.

Rozdílnost ve změřeném a vypočteném jasu oslňujícího zdroje a jasu pozadí může být způsobena nedokonalostí modelované místnosti v simulačním programu, kdy nebyly přesně určeny činitele odrazu pro všechny povrchy. Světelný tok svítidel, který byl stanovený, aby vytvořil zmiňovanou osvětlenost 350 lx nemusel odpovídat reálnému světelnému toku svítidel. Pro dosažení přesnějších výsledků by bylo potřeba činitele odrazu všech uvažovaných povrchů stanovit měřením. Taktéž by bylo vhodné provést vlastní fotometrické měření testovaných svítidel.

Další skutečnost, která mohla ovlivnit naměřená data byla zjištěna po provedení pokusného měření. Vlivem řízení světelného zdroje a interferencí mezi LED moduly docházelo k určitému blikání svítidla. Toto blikání bylo vyhodnoceno za pomoci rychlého fotočlánku připojeného na osciloskop. Zachycené průběhy kolísání intenzity v čase z tohoto měření jsou na obr. 7-4. V čase různě měnící se průběhy kmitaly s frekvencí 350 Hz. Při snímání vyhodnocované scény měření s dobou expozice kratší než 1/350 tak mohlo docházet k větší chybě díky tomuto blikání. Tato chyba může být minimalizována použitím doby expozice delší než 1/350 a při současném vyhodnocení scény několika snímků, které by se následně statisticky vyhodnotily, aby blikání bylo eliminováno. Nebo by se focená scéna mohla snímat pro velmi dlouhé doby expozice. Aby nedocházelo k přesycení snímacího čipu bylo by nutné nastavení většího clonového čísla. Pro větší kontrolu nad délkou expozice by taktéž mohl být využit tzv. šedý filtr.



Obr. 7-4: Průběhy z měření svítidla pomocí rychlého fotočlánku.



### 7.3.4 Vliv výběru plochy vyzařování

V předchozím zpracování měření a porovnání se simulací byly použity změřené hodnoty UGR stanovené postupem, kdy jednotlivá svítidla byla manuálně vybrána a pomocí funkce vymezení svítidla byly vybrány jednotlivé svítící plochy. Průměrný jas a prostorový úhel je pak vypočten z těchto svítících plošek. Činitel polohy je určen pro celý objekt vybraného svítidla. Pro příklad bude nyní popsán vliv uvažování jiného způsobu výběru hodnoceného svítidla. Vyhodnocení tohoto vlivu bude provedeno na svítidlu S3.

Dalším možným způsobem výběru hodnoceného svítidla je manuální označení jednotlivých svítících ploch a uvažovat je jako samostatná svítidla. Výsledná data z analýzy oslnění při uvažování tohoto výběru svítící plochy jsou uvedena v příloze G.

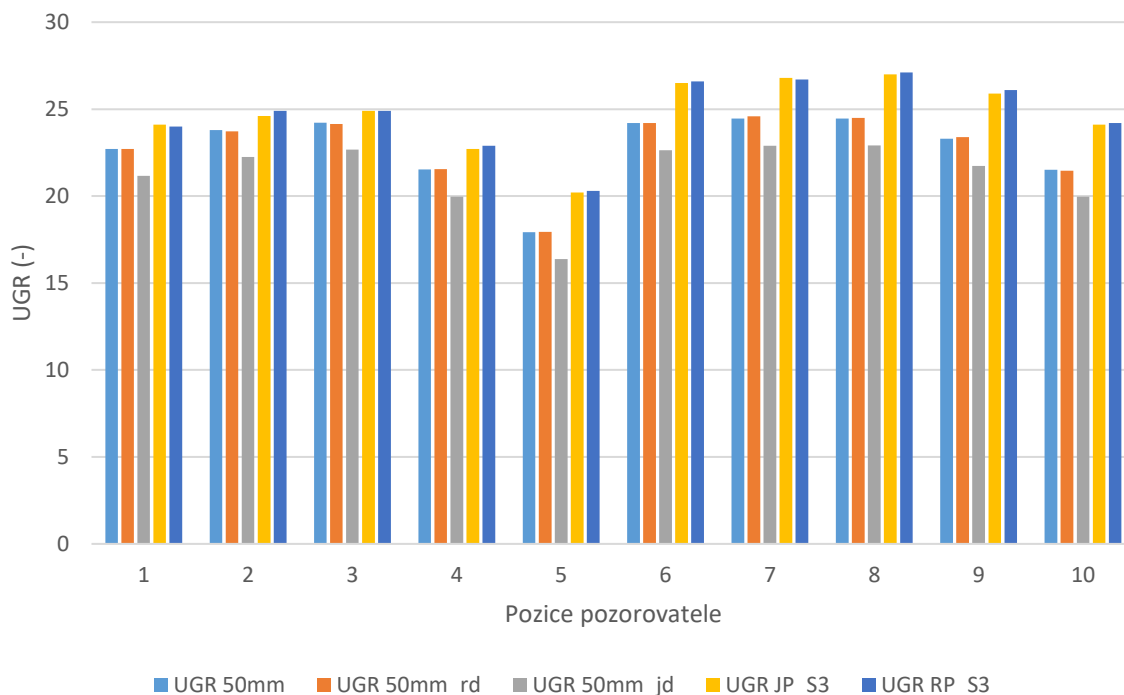
Poslední způsob výběru plochy vyzařování svítidla je proveden tak, že se vybere jedním hodnotícím objektem celá plocha vyzařování, tedy svítící plošky společně s nesvítícími místy mezi těmito ploškami. Výsledná hodnota  $UGR_{50mm\_jd}$  takto stanoveným postupem je uvedena v tab. 7-5 společně se změřenými hodnotami UGR při uvažování různých výběrů plochy vyzařování. V této tabulce jsou také uvedeny hodnoty získané ze simulace. Pro názorné porovnání byly tyto hodnoty vyneseny do grafu, který je vyobrazen na obr. 7-5. Legenda označení hodnot UGR k tab. 7-5 a grafu na obr. 7-5 je uvedena v tab. 7-4.

Tab. 7-4: Legenda k tab. 7-5 a obr. 7-4 pro jednotlivé hodnoty UGR.

Označení hodnoty UGR	Způsob výběru svítící plochy svítidla
$UGR_{50mm}$	Výběr celého svítidla s detekcí plošek pomocí mezního jasu
$UGR_{50mm\_rd}$	Výběr jednotlivých svítících ploch jako svítidel
$UGR_{50mm\_jd}$	Výběr celého svítidla bez detekce svítících ploch
$UGR_{JP\_S3}$	Hodnoty ze simulace pro jednu svítící plochu
$UGR_{RP\_S3}$	Hodnoty ze simulace pro rozdělenou svítící plochu

Tab. 7-5: Hodnota UGR z měření a simulace pro různé uvažování výběru plochy vyzařování.

Pozice	$UGR_{50mm}$	$UGR_{50mm\_rd}$	$UGR_{50mm\_jd}$	$UGR_{JP\_S3}$	$UGR_{RP\_S3}$
(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
P1	22,71	22,7	21,16	24,1	24
P2	23,8	23,72	22,24	24,6	24,9
P3	24,22	24,14	22,67	24,9	24,9
P4	21,53	21,55	19,97	22,7	22,9
P5	17,92	17,94	16,37	20,2	20,3
P6	24,2	24,2	22,64	26,5	26,6
P7	24,45	24,58	22,9	26,8	26,7
P8	24,46	24,5	22,91	27	27,1
P9	23,29	23,39	21,74	25,9	26,1
P10	21,51	21,45	19,96	24,1	24,2



Obr. 7-5: Hodnota UGR z měření a simulace pro různé uvažování výběru plochy vyzařování pro jednotlivá místa pozorovatele.

Ze sloupcového grafu na obr. 7-5 je patrné, že pro všechny pozice pozorovatele nastaly stejné tendence rozdílu v hodnotě UGR v závislosti na různém výběru plochy vyzařování. Dále může být konstatováno, že mezi výběrem svítící plochy svítidla jedním hodnotícím polem s daným mezním jasnem a výběrem svítících ploch jako samostatných svítidel není žádný rozdíl. To potvrzuje závěry stanovené pomocí simulace.

Větší rozdíl v hodnotě UGR ovšem nastane při uvažování výběru celého svítidla bez detekce svítících ploch. Výběr tímto způsobem vede k většímu prostorovému úhlu, obdržíme ale menší průměrný jas. Tímto způsobem tak byla vyhodnocena menší hodnota UGR.

Svítidlo S3 bylo vybráno pro analýzu vlivu výběru svítící plochy svítidla z důvodu snazšího výběru těchto ploch. Pro svítidla o větším rastru svítících ploch by byl výběr těchto ploch jako samostatných svítidel velmi náročný.

U svítidla S6 u kterého plocha vyzařování téměř splývala v jednu plochu byl vyzkoušen postup nastavení mezního jasu uvedený v kapitole 5.5.2. Byl nastavován různý mezní jas a byla odečítána hodnota UGR. Výsledné hodnoty jsou v tab. 7-6. Z uvedených hodnot je vidět vliv nastavení mezního jasu. Při zvyšování mezního jasu roste hodnota UGR při dalším zvyšování poté hodnota UGR zase klesá. To je v souladu s poznatky z výše zmíněné kapitoly o nastavování mezního jasu.

Tab. 7-6: Vliv mezního jasu pro výběr svítící plochy na hodnotu UGR

$L_{mez}$	( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	500	1500	2000	2500
UGR	(-)	24,947	25,196	25,245	25,183

## 7.4 Zhodnocení pokusného měření a definování dalšího postupu

V rámci této kapitoly bylo nasimulováno a prakticky vyhodnoceno oslnění od testovaných svítidel pomocí jasového analyzátoru.

Provedené měření potvrdilo závěry stanovené ze simulace experimentu. Uvažování jedné svítící plochy vytvořené součtem elementárních svítících ploch svítidla nevede k téměř žádné chybě ve stanovení UGR. To ovšem platí pouze pokud je správně určen průměrný jas svítidla.

Pro detailní zjištění vlivu neuniformity plochy vyzařování testovaných svítidel by bylo nutné naměřená a nasimulovaná data porovnat se subjektivním hodnocením. Dalším postupem ve vyšetření vlivu neuniformity svítidla by bylo provedení subjektivního hodnocení oslnění. Pro subjektivní hodnocení byl vytvořen dotazník pro vyhodnocování oslnění (uveden v příloze H) a společně s poznatky o měření rušivého oslnění z kapitoly 3 může být subjektivní hodnocení provedeno v návaznosti na simulaci experimentu a vyhodnocení oslnění pomocí jasového analyzátoru.

## 8 ZÁVĚR

Úvodní kapitola této diplomové práce se věnovala popisu samotné problematiky týkající se oslnění. Oslnění zde bylo teoreticky popsáno a byly zde uvedeny kategorie třídění oslnění. Další část kapitoly se zabývala hodnocením oslnění. Pro hodnocení oslnění se v současnosti používá činitel oslnění UGR, který je doporučován Mezinárodní komisí pro osvětlování CIE.

Jelikož chybí teoretické pochopení přesné příčiny vzniku rušivého oslnění, vyšetřuje se vnímání oslnění statistickým zpracováním výsledků různých experimentálních měření. Část diplomové práce se tak věnovala určitým metodám těchto pokusných měření.

Další část této diplomové práce byla zaměřena na popis parametrů, které ovlivňují jednotnost vyzařovací plochy svítidla. Jelikož neuniformní svítidlo je ve většině případů chápáno jako LED svítidlo, byly zde popsány vlivy na neuniformitu z hlediska LED svítidla. Mezi tyto vlivy patří například kontrast jasu, počet LED tvořící svítidlo nebo vliv pozorovacího úhlu.

Poté byla provedena literární rešerše studií zabývajících se problematikou oslnění od neuniformních zdrojů oslnění. Všechny zkoumané studie uváděly nesoulad v hodnocení oslnění pomocí UGR mezi uniformním a neuniformním typem svítidla. Je proto nutné stanovit činitel oslnění, který respektuje vnímání oslnění jak od uniformního, tak neuniformního typu svítidla. Studie uvádějí různě modifikované vztahy UGR pro výpočet oslnění. Všeobecnému použití těchto vztahů ale brání skutečnost, že byly stanoveny při konkrétních laboratorních podmínkách a experimentálního vyhodnocování se účastnil malý vzorek pozorovatelů.

Dále se práce věnuje využití jasové analýzy pro vyhodnocení oslnění. Za pomoci jasového analyzátoru lze poměrně snadno vyhodnotit oslnění podle metodiky UGR a dle studie popsané v rešeršní části práce lze takto vyhodnotit oslnění i od neuniformního svítidla.

V rámci vlastní praktické práce byly nejprve provedeny modelové simulace oslnění, se snahou stanovit některé vlivy neuniformity na velikost UGR. Byl zde simulován vliv kontrastu jasu na povrchu vyzařování svítidla a vliv poměru plochy vyzařování. Hlavní část praktické práce pak tvoří vlastní pokusné měření. Do místnosti měření byla instalována testovaná svítidla a bylo vytvořeno grafické rozhraní pro ovládání těchto svítidel. Hlavní motivací k pokusnému měření bylo vyšetření vlivu různého rozložení svítících ploch na povrchu vyzařování testovaných svítidel. Z praktického měření vyplývá, že zjednodušený popis svítidla jednou svítící plochou, která odpovídá celkové ploše svítících částí uspořádaných v určitém rastru, nezpůsobuje chybu ve stanovení hodnoty UGR. Důležité je ale stanovit správný průměrný jas svítidla. Vlastním přínosem této práce je tak stanovení a ověření základních poznatků o hodnocení oslnění od neuniformních svítidel.

### 8.1 Návrh dalšího postupu

Díky dlouhé době čekání na zakázkově vyrobená testovaná svítidla nebylo provedeno subjektivní hodnocení, které je časově velmi náročné a pro relevantnost výsledků je zde potřeba otestovat velké množství subjektů. V návaznosti na tuto práci by tak bylo provedeno subjektivní vyhodnocování oslnění. Pro stanovení vlastních opravných funkcí pro UGR metodiku, aby respektovala vnímání oslnění jak od uniformního, tak neuniformního zdroje oslnění by bylo potřebné experimentálně ověřit všechny další vlivy způsobující neuniformitu uvedené v rešeršní části práce.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HABEL, J., ŽÁK, P. *Elektrické světlo 1*. Praha, 2011.
- [2] BAXANT, P. *Světelná technika: Elektronický text č. EEN608, Přednášky a cvičení*. 2006. Brno.
- [3] CIE 1995. CIE 117:1995. *Discomfort glare in interior lighting*. Vienna: Commission internationale de l'éclairage, 1995. ISBN 9783900734701.
- [4] SKODA, J., SUMEC, S., BAXANT, P. Position index in discomfort glare calculation. In *Lux Europa 2013 Proceedings*. 2013. s. 755-760. ISBN: 978-83-910849-6- 0.
- [5] ČSN EN 12464-1 (360450). *Světlo a osvětlení: Osvětlení pracovních prostorů* (2012).
- [6] HOPKINSON, R.G. Evaluation of glare. *Illuminating Engineering* 52.305 (1957): 329-336.
- [7] SCHEIR, G.H. at al. Calculation of the Unified Glare Rating based on luminance maps for uniform and non-uniform light sources. *Building and Environment*, (84) 2015, p. 60-67.
- [8] ŽÁK, P. *Zábrana oslnění při návrzích osvětlení* [online]. [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <https://goo.gl/OYuLVW>
- [9] YANG Y., LUO R.M. et al. Assessing glare. Part 1: Comparing uniform and nonuniform LED luminaires. *Lighting Research and Technology*, 2015, p. 1-16.
- [10] PAUL B.M., EINHORN H.D. Discomfort glare from small light sources. *Lighting Research and Technology*, 1999, p. 139–144.
- [11] EBLE-HANKINS, M. *Subjective impression of discomfort glare from sources of non-uniform luminance (2008)*. Architectural Engineering -- Dissertations and Student Research. Paper 1.
- [12] TYUKHOVA, Y. *Discomfort glare from small, high luminance light sources in outdoor nighttime environments (2015)*. Architectural Engineering -- Dissertations and Student Research. Paper 36.
- [13] VIENOT, F. at al. Kruithof's rule revisited using LED illumination. *Journal of Modern Optics* 56.13 (2009): 1433-1446.
- [14] LIN, Y. et al. Eye Movement and Pupil Size Constriction Under Discomfort Glare. Physiological Responses Under Discomfort Glare. *Investigative ophthalmology & visual science*, 2015, 56.3: 1649-1656.
- [15] GEERDINCK, L.M. *Discomfort glare of non-uniform luminaires*. Philips, Eindhoven, Netherlands, Technische universitat Ilmenau, Germany, 2016.
- [16] JUNG, S.G. et al. A study of UGR for non-uniform luminance source. In *Proceedings of Lux Europa 2009*, Istanbul, Turkey, p. 553-558.
- [17] YANG, Y. at al. Discomfort glare by non-uniform white LED matrices. In *Proceedings of the 28th Session of the CIE*, Manchester, UK, 2015, p. 393-399.
- [18] HIGASHI, H., KOGA, S., KOTANI, T. The development of evaluation for discomfort glare in LED lighting of indoor work place: the effect of the luminance distribution of luminous

- parts on subjective evaluation. In *Proceedings of CIE Centenary Conference: Toward a New Century of Light*. 2013. p. 648-656.
- [19] HIGASHI, H., KOGA, S., KOTANI, T. The development of evaluation for discomfort glare in LED lighting of indoor work place—Relationship between UGR and subjective evaluation. In *Proceedings of CIE*. 2012. p. 706-712.
- [20] TASHIRO, T. et al. Discomfort glare for white LED light sources with different spatial arrangements. *Lighting Research & Technology* 2015, 47, o. 316-337.
- [21] KASAHARA, T. et al. Discomfort glare caused by white LED light source. *Journal of Light and Visual Environment* 2006, 38, 743-757.
- [22] TAKAHASHI, H. et al. Position index for the matrix light source. *Journal of Light and Visual Environment* 2007, 31, 128-133.
- [23] GEERDINCK, L.M., et al. Discomfort glare perception of non-uniform light sources in an office setting. *Journal of Environmental Psychology*, 39 (0) (2014), pp. 5–13.
- [24] SKODA, J., et al. Measurement of Discomfort Glare Throught the Luminance Analyzer. In *Proceedings of 28th CIE Session*, 2015, 1: 1374-1381.
- [25] ŠKODA, J. *Nekonvenční metody měření ve fotometrii*. Disertační práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2011, 106 stran.
- [26] NÁLEVKA, L. *Software na vytvoření jasové mapy z digitální fotografie*. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014, 49 s.
- [27] SCHEIR G.H., et al. Effect of luminance contrast on the perception of discomfort. In *Proceedings of the 28th CIE Session*, Manchester, UK, 28 June – 4 July: 2015: 1870–1876.
- [28] LOU, D. et al. Evaluation of glare from non-uniform luminaires. In *Proceedings of the 28th Session of the CIE*, Manchester, UK, p. 1471-1480.
- [29] HELVAR. *Datasheet LL60/2-E-DA-iC* [online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <https://goo.gl/8m5nHJ>
- [30] HELVAR [Designer Software Suite]. [online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <https://goo.gl/Amv4ny>
- [31] HELVAR [TouchStudio]. [online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <https://goo.gl/ELPNnL>
- [32] BAXANT, P. Elektronické formáty popisu svítidel, aneb není format jako formát. In *Kurz osvětlovací techniky XXVI 2008*, Kouty nad Desnou, str. 16-20.
- [33] SVOBODA, M. *Srovnání konvenčních a nových metod měření a hodnocení jasů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 84 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Grafické zpracování ze studie uvedené v literatuře [11].

- A1 – Výsledky subjektivního hodnocení v hlavním experimentu pro uniformní svítidlo.
- A2 – Výsledky první revize.
- A3 – Výsledky po provedení druhé revize.

Příloha B – Tabulka hodnot světelného toku při simulaci vlivu poměru plochy vyzařování.

Příloha C – Zachycení reálné scény místnosti měření a namodelovaná místnost v simulačním programu.

Příloha D – Schematický náčrt masek svítidel použitých při pokusném měření.

Příloha E – Výsledné hodnoty UGR z provedených simulací.

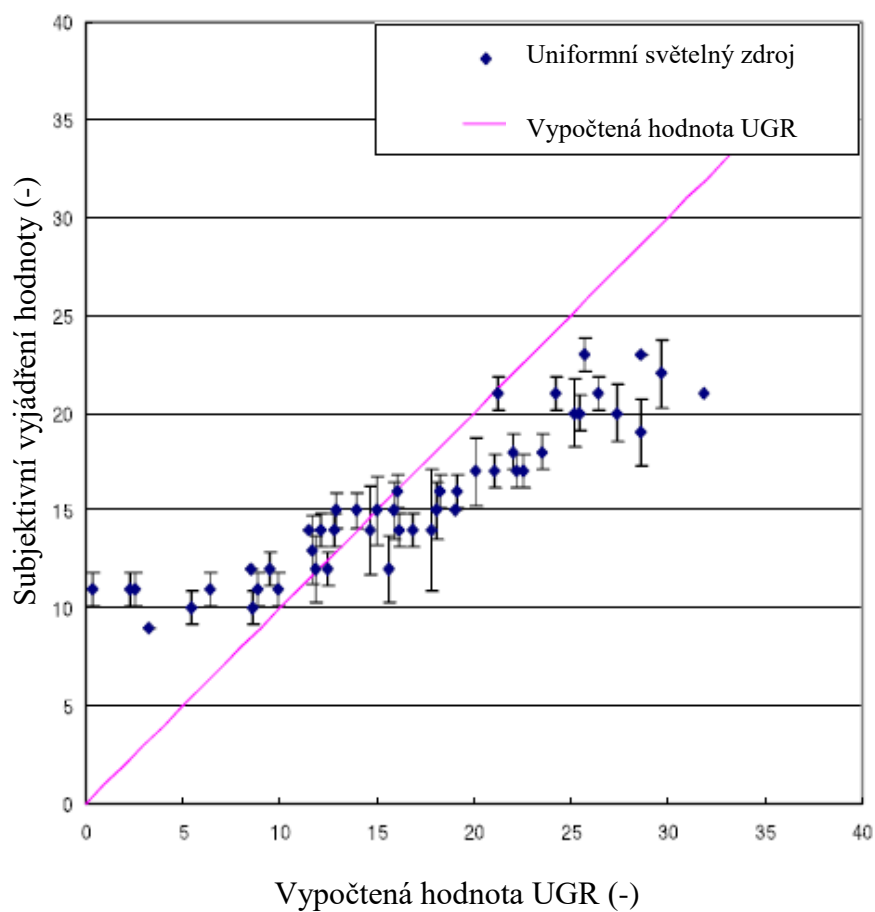
- E1 – Výsledné hodnoty UGR z provedených simulací oslnění.
- E2 – Porovnání hodnot UGR z provedených simulací oslnění.

Příloha F – Tabulka hodnot z analýzy oslnění provedené v pokusném měření.

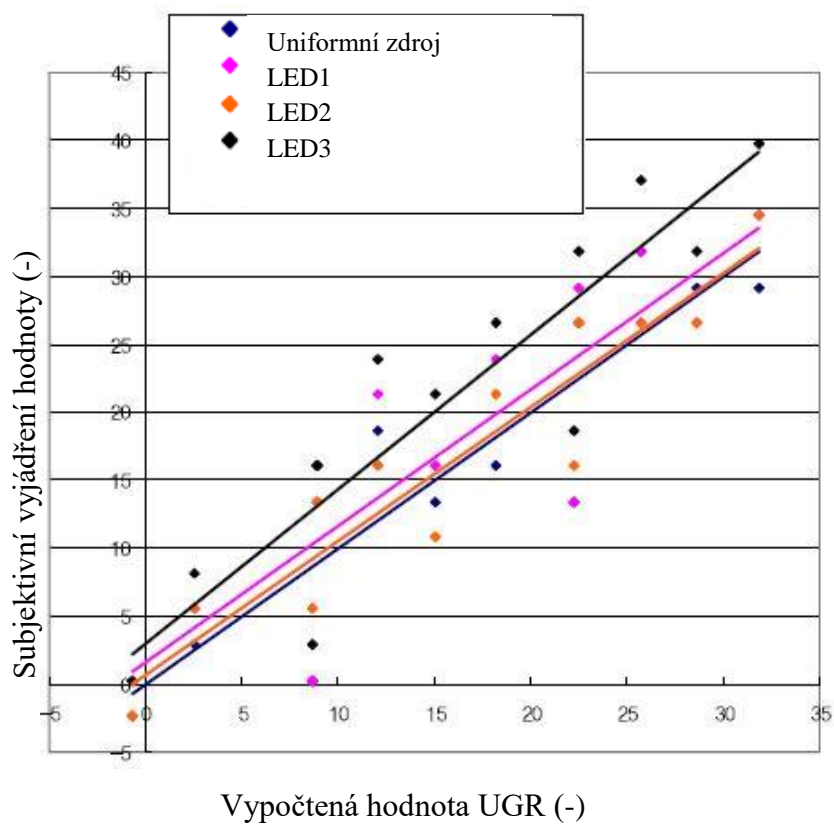
Příloha G – Tabulka hodnot z analýzy oslnění svítidla S3 provedené v pokusném měření při uvažování rozdělení svítidla na 4 samostatná svítidla.

Příloha H – Dotazník pro subjektivní vyhodnocování oslnění při pokusném měření.

Příloha A1 – Výsledky subjektivního hodnocení v hlavním experimentu pro uniformní svítidlo.

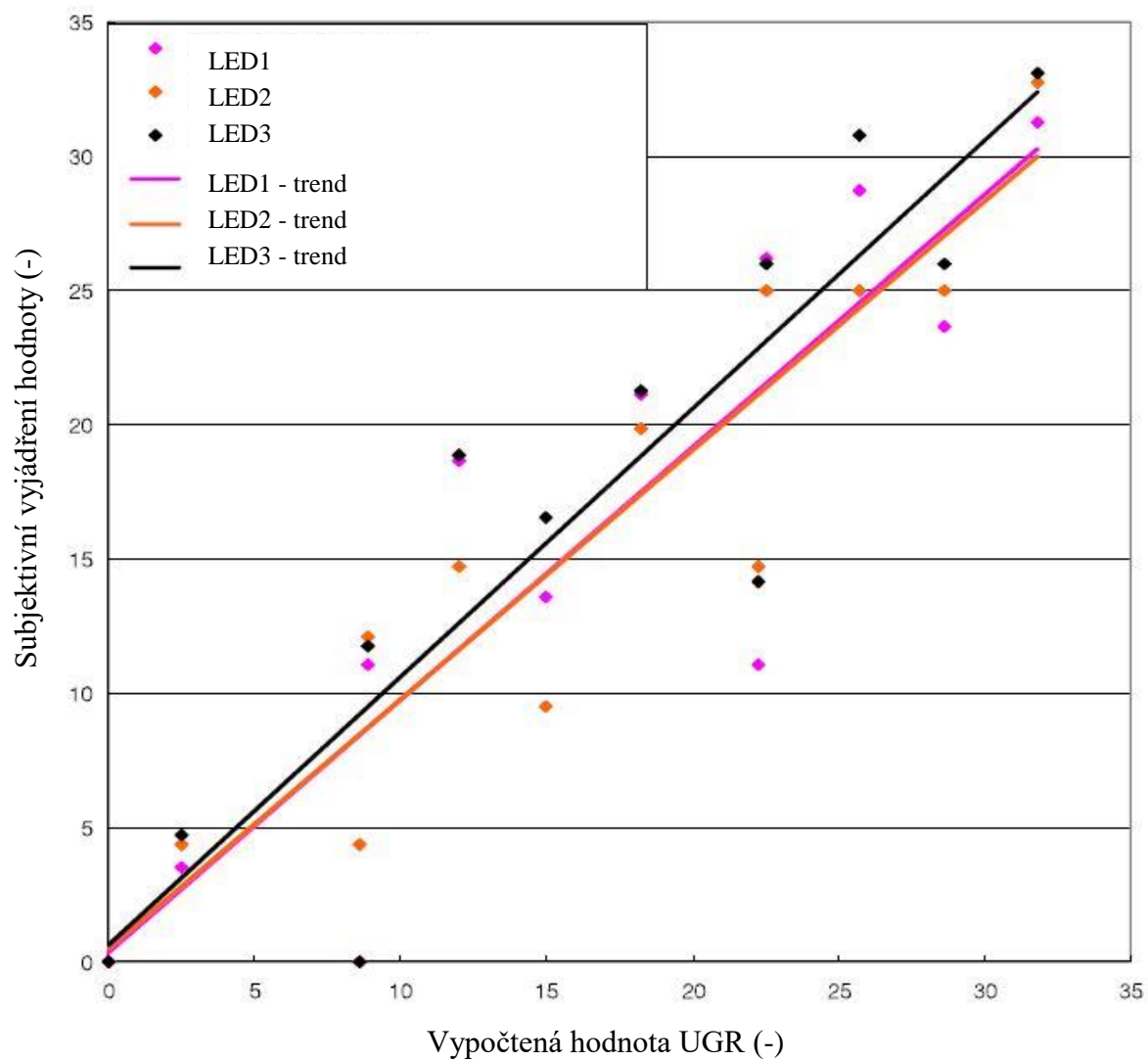


Příloha A2 – Výsledky první revize.





Příloha A3 – Výsledky po provedení druhé revize.



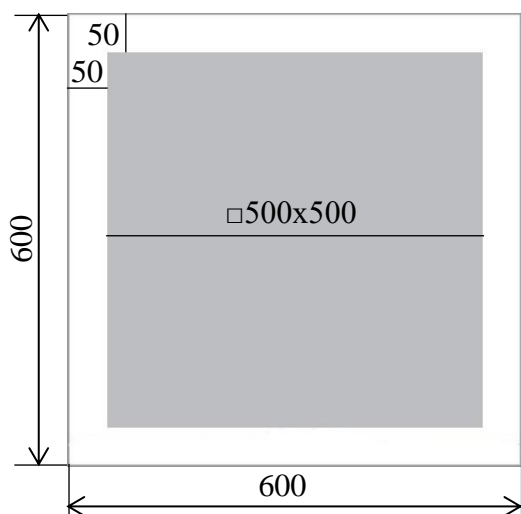
Příloha B – Tabulka hodnot světelného toku svítidla L1, při simulaci vlivu poměru plochy vyzařování.

Simulace č.	$A_{r\_element}$	$A_{r\_p}$	$L_o$ (cd·m <sup>-2</sup> )				
			1000	4000	9000	15000	23000
	(m <sup>2</sup> )	(%)	$\Phi$ (lm)				
1	0,0225	9,00	70,68803	282,7521	636,1923	1060,32	1625,825
2	0,0380	15,21	119,4628	477,8511	1075,165	1791,942	2747,644
3	0,0576	23,04	180,9614	723,8454	1628,652	2714,42	4162,111
4	0,0812	32,49	255,1838	1020,735	2296,654	3827,757	5869,227
5	0,1089	43,56	342,1301	1368,52	3079,171	5131,951	7868,992
6	0,1406	56,25	441,8002	1767,201	3976,202	6627,003	10161,4
7	0,1764	70,56	554,1942	2216,777	4987,747	8312,912	12746,47
8	0,2162	86,49	679,312	2717,248	6113,808	10189,68	15624,18
9	0,2500	100,00	785,4226	3141,69	7068,803	11781,34	18064,72

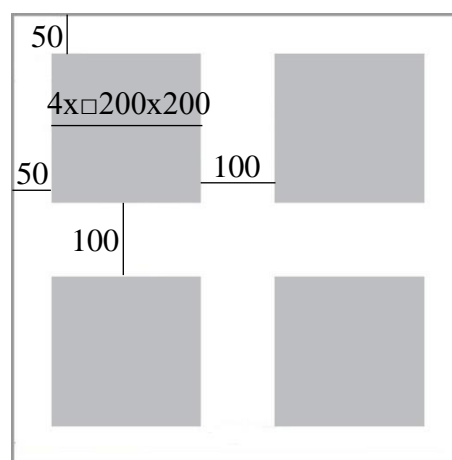
Příloha C – Zachycení reálné scény místnosti měření (nahore) a namodelovaná místnost v simulačním programu (dole).



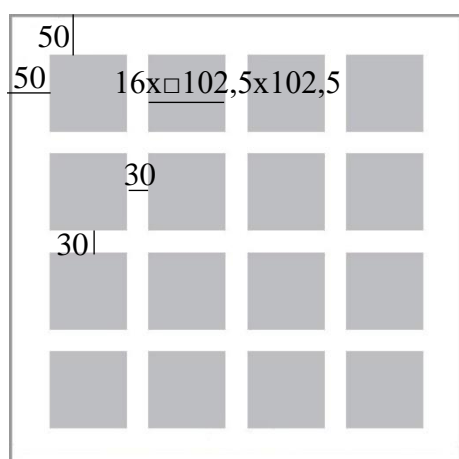
Příloha C – Schematický nákres masek svítidel použitých při pokusném měření, rozměry jsou uvedené v mm.



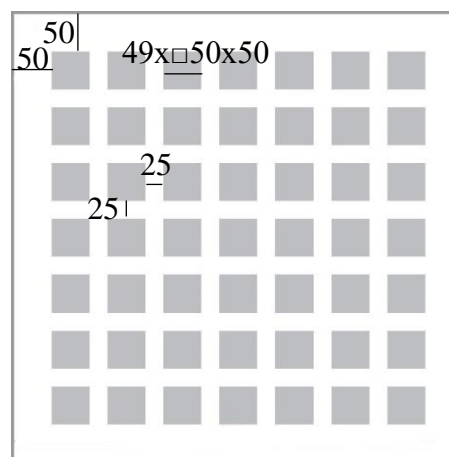
S1 a S2, 1x1,  $A_r = 0,25 \text{ m}^2$



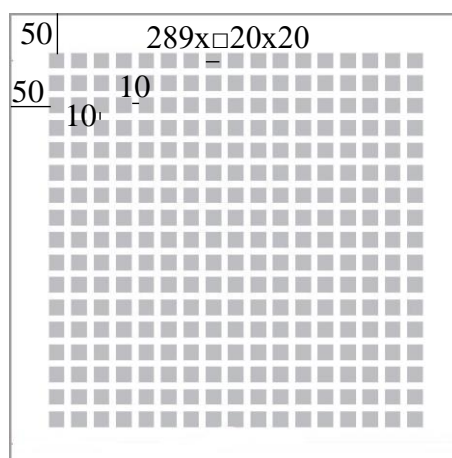
S3, 2x2,  $A_r = 0,16 \text{ m}^2$



S4, 4x4,  $A_r = 0,1681 \text{ m}^2$



S5, 7x7,  $A_r = 0,1225 \text{ m}^2$



S6, 17x17,  $A_r = 0,1156 \text{ m}^2$

Příloha E1 – Výsledné hodnoty UGR z provedených simulací oslnění.

Pozice pozorovatele	Svítidla – jedna svítící plocha					Svítidla – rozdělená svítící plocha				
	UGR <sub>JP_S2</sub>	UGR <sub>JP_S3</sub>	UGR <sub>JP_S4</sub>	UGR <sub>JP_S5</sub>	UGR <sub>JP_S6</sub>	UGR <sub>RP_S2</sub>	UGR <sub>RP_S3</sub>	UGR <sub>RP_S4</sub>	UGR <sub>RP_S5</sub>	UGR <sub>RP_S6</sub>
P1	21,5	24,1	22,1	21,0	18,8	21,4	24,0	22,0	20,8	18,8
P2	22,1	24,6	24,8	23,6	20,9	22,0	24,9	24,7	23,7	20,8
P3	20,2	24,9	24,9	25,8	23,0	20,2	24,9	25,1	25,8	23,2
P4	18,1	22,7	24,9	25,6	24,8	18,1	22,9	25,1	25,7	24,9
P5	16,2	20,2	22,3	25,2	24,3	16,2	20,3	22,1	25,1	24,4
P6	24,3	26,5	25,6	24,9	22,8	24,2	26,6	25,5	24,9	22,8
P7	24,5	26,8	26,8	26,8	24,6	24,5	26,7	26,8	26,7	24,6
P8	23,6	27,0	26,8	27,9	26,2	23,6	27,1	26,9	27,8	26,2
P9	21,9	25,9	27,0	27,6	27,2	21,9	26,1	27,0	27,5	27,2
P10	20,1	24,1	25,6	27,4	27,0	20,2	24,2	25,7	27,4	27,0

Příloha E2 – Porovnání hodnot UGR z provedených simulací oslnění.

Pozice pozorovatele	Svítidla – rozdíl				
	$\Delta UGR_{S2}$	$\Delta UGR_{S3}$	$\Delta UGR_{S4}$	$\Delta UGR_{S5}$	$\Delta UGR_{S6}$
P1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0
P2	0,1	-0,3	0,1	-0,1	0,1
P3	0,0	0,0	-0,2	0,0	-0,2
P4	0,0	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1
P5	0,0	-0,1	0,2	0,1	-0,1
P6	0,1	-0,1	0,1	0,0	0,0
P7	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
P8	0,0	-0,1	-0,1	0,1	0,0
P9	0,0	-0,2	0,0	0,1	0,0
P10	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0

Příloha F – Tabulka hodnot z analýzy oslnění provedené v pokusném měření.

Svítidlo S2									
Pozice	$L_p$	$L_{z50mm}$	$L_{zFishEye}$	$\Omega$	$p$	UGR <sub>50mm</sub>	UGR <sub>FishEye</sub>	UGR <sub>RP</sub>	$\delta\%UGR$
(-)	( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	(sr)	(-)	(-)	(-)	(-)	(%)
1	17,60	5202	4327	0,01620	4,09	20,57	19,29	21,4	4,05
2	14,70	4967	3830	0,01300	3,84	20,54	18,74	22,0	7,08
3	11,30	5020	3920	0,00785	4,86	18,14	16,42	20,2	11,34
4	8,94	5150	3436	0,00436	5,98	15,65	12,84	18,1	15,67
5	7,68	4044	3113	0,00253	6,77	11,74	9,93	16,2	39,65
6	7,42	4255	2983	0,00324	2,11	21,18	18,71	24,2	14,25
7	6,81	4549	3166	0,00297	1,99	22,05	19,53	24,5	11,13
8	6,39	4370	3105	0,00243	2,27	20,37	17,99	23,6	15,87
9	5,75	4313	2840	0,00182	2,75	18,31	15,40	21,9	19,63
10	5,38	3999	2599	0,00133	3,29	15,69	12,70	20,2	28,75
Svítidlo S3									
Pozice	$L_p$	$L_{z50mm}$	$L_{zFishEye}$	$\Omega$	$p$	UGR <sub>50mm</sub>	UGR <sub>FishEye</sub>	UGR <sub>RP</sub>	$\delta\%UGR$
(-)	( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	(sr)	(-)	(-)	(-)	(-)	(%)
1	15,46	8366,34	6333	0,00913	3,87	22,71	20,78	24,0	5,67
2	15,19	9178	6429	0,01100	4,02	23,80	21,32	24,9	4,64
3	13,40	9806	6420	0,00906	3,91	24,22	21,27	24,9	2,82
4	10,68	9418	5432	0,00562	4,88	21,53	17,70	22,9	6,39
5	9,15	8073	4642	0,00333	5,84	17,92	14,08	20,3	13,26
6	7,31	7459	4501	0,00229	2,03	24,20	20,69	26,6	9,94
7	6,90	7434	4375	0,00246	2,08	24,45	20,77	26,7	9,19
8	6,76	7315	4397	0,00234	2,01	24,46	20,92	27,1	10,80
9	6,26	7439	3882	0,00190	2,27	23,29	18,77	26,1	12,07
10	5,97	7464	3791	0,00160	2,76	21,51	16,80	24,2	12,50
Svítidlo S4									
Pozice	$L_p$	$L_{z50mm}$	$L_{zFishEye}$	$\Omega$	$p$	UGR <sub>50mm</sub>	UGR <sub>FishEye</sub>	UGR <sub>RP</sub>	$\delta\%UGR$
(-)	( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	(sr)	(-)	(-)	(-)	(-)	(%)
1	11,94	8341	4622	0,00733	4,79	21,34	17,24	22,0	3,10
2	13,57	7785	5675	0,01080	3,78	23,42	21,22	24,7	5,48
3	14,18	9829	5779	0,01300	4,10	24,95	21,26	25,1	0,59
4	13,38	8648	5411	0,01080	3,92	23,94	20,68	25,1	4,86
5	11,86	8085	4417	0,00723	4,77	21,12	16,92	22,1	4,62
6	6,71	6304	3422	0,00241	2,28	22,69	18,45	25,5	12,36
7	6,76	7212	3758	0,00270	1,98	24,98	20,45	26,8	7,30
8	6,91	7665	3973	0,00290	2,10	25,17	20,61	26,9	6,86
9	6,83	7201	3753	0,00284	2,02	24,98	20,45	27,0	8,08
10	6,73	6913	3490	0,00246	2,28	23,39	18,64	25,7	9,90

Svítidlo S5									
Pozice	$L_p$	$L_{z50mm}$	$L_{zFishEye}$	$\Omega$	$p$	UGR <sub>50mm</sub>	UGR <sub>FishEye</sub>	UGR <sub>RP</sub>	$\delta_{\%UGR}$
(-)	(cd·m <sup>-2</sup> )	(cd·m <sup>-2</sup> )	(cd·m <sup>-2</sup> )	(sr)	(-)	(-)	(-)	(-)	(%)
1	9,23	8512	3793	0,00434	5,88	19,13	13,52	20,8	8,72
2	11,05	10212	4705	0,00727	4,68	23,16	17,77	23,7	2,35
3	13,49	11055	5097	0,01040	3,88	25,56	20,18	25,8	0,94
4	15,59	11363	5653	0,01260	4,15	25,44	20,59	25,7	1,01
5	15,77	11148	5242	0,01100	3,85	25,32	20,08	25,1	-0,87
6	6,21	7442	3240	0,00186	2,77	21,86	16,08	24,9	13,89
7	6,35	9057	3410	0,00245	2,22	25,64	18,86	26,7	4,11
8	6,91	10329	3653	0,00290	1,99	27,61	20,39	27,8	0,69
9	7,27	11094	3834	0,00320	2,10	27,90	20,52	27,5	-1,44
10	7,52	9041	3626	0,00290	2,03	26,27	19,92	27,4	4,32
Svítidlo S6									
Pozice	$L_p$	$L_{z50mm}$	$L_{zFishEye}$	$\Omega$	$p$	UGR <sub>50mm</sub>	UGR <sub>FishEye</sub>	UGR <sub>RP</sub>	$\delta_{\%UGR}$
(-)	(cd·m <sup>-2</sup> )	(cd·m <sup>-2</sup> )	(cd·m <sup>-2</sup> )	(sr)	(-)	(-)	(-)	(-)	(%)
1	8,06	7244	3212	0,00255	6,82	15,60	9,95	18,8	20,48
2	9,46	7856	3506	0,00440	5,70	18,75	13,15	20,8	10,91
3	11,43	9789	3832	0,00780	4,78	22,84	16,32	23,2	1,59
4	15,64	10856	4071	0,01290	3,92	25,59	18,78	24,9	-2,71
5	18,80	10142	4306	0,01600	4,07	24,97	19,01	24,4	-2,27
6	5,62	5876	2788	0,00130	3,27	18,17	12,98	22,8	25,52
7	6,21	6744	2996	0,00180	2,68	21,29	15,66	24,6	15,53
8	6,93	7265	3230	0,00245	2,23	23,77	18,14	26,2	10,22
9	7,48	7740	3502	0,00296	2,00	25,38	19,87	27,2	7,15
10	7,91	8014	3418	0,00310	2,11	25,20	19,28	27,0	7,13

Příloha G – Tabulka hodnot z analýzy oslnění svítidla S3 provedené v pokusném měření při uvažování rozdělení svítidla na 4 samostatná svítidla.

Pozice	Část	$L_p$	$L_{z50mm}$	$L_{zFishEye}$	$\Omega$	$p$	UGR <sub>50mm_rd</sub>	UGR <sub>FishEye</sub>
(-)	(-)	(cd·m <sup>-2</sup> )	(cd·m <sup>-2</sup> )	(cd·m <sup>-2</sup> )	(sr)	(-)	(-)	(-)
1	1	15,46	7183	5435	0,00229	3,87	22,70	20,75
	2	15,46	8006	5986	0,00194	3,65		
	3	15,46	8654	6332	0,00213	3,55		
	4	15,46	9471	7431	0,00240	4,13		
2	1	15,19	8146	6111	0,00241	3,67	23,72	21,37
	2	15,19	8617	5706	0,00239	3,67		
	3	15,19	9509	7112	0,00310	4,22		
	4	15,19	9510	6549	0,00309	4,28		
3	1	13,43	8729	5336	0,00190	3,69	24,14	21,25
	2	13,43	8907	6409	0,00210	3,58		
	3	13,43	10315	6086	0,00240	4,27		
	4	13,43	10846	7516	0,00265	4,13		
4	1	10,68	8271	4814	0,00121	4,64	21,55	17,73
	2	10,68	9169	5320	0,00139	4,36		
	3	10,68	9518	5374	0,00140	5,41		
	4	10,68	10399	6034	0,00163	5,09		
5	1	9,15	6669	3958	0,00073	5,57	17,94	14,07
	2	9,15	8356	4751	0,00085	5,40		
	3	9,15	7406	4414	0,00079	6,39		
	4	9,15	9488	5261	0,00095	6,16		
6	1	7,31	6961	3993	0,00051	1,99	24,20	20,71
	2	7,31	6711	4215	0,00054	1,96		
	3	7,31	8235	4719	0,00060	2,08		
	4	7,31	7700	4941	0,00064	2,05		
7	1	6,90	6756	4106	0,00057	2,00	24,58	20,90
	2	6,90	6655	3848	0,00056	2,00		
	3	6,90	7948	4998	0,00066	2,08		
	4	6,90	8160	4430	0,00068	2,08		
8	1	6,76	6420	3948	0,00053	1,98	24,50	20,94
	2	6,76	6758	4113	0,00053	1,95		
	3	6,76	7670	4648	0,00063	2,07		
	4	6,76	8228	4754	0,00065	2,03		
9	1	6,26	6582	3470	0,00044	2,25	23,39	18,86
	2	6,26	7036	3725	0,00046	2,17		
	3	6,26	7656	3966	0,00051	2,39		
	4	6,26	8285	4260	0,00055	2,28		
10	1	5,98	7099	3707	0,00039	2,92	21,45	16,84
	2	5,98	8886	4574	0,00042	2,78		
	3	5,98	7473	3774	0,00038	2,61		
	4	5,98	6172	3239	0,00035	2,74		



Příloha H – Dotazník pro subjektivní vyhodnocování oslnění při pokusném měření.

## Subjektivní hodnocení oslnění

Anonymní dotazník

### Údaje o hodnotící osobě

Datum narození: . . .

Kontakt (e-mail)\*: .....

Žena ☐ Muž ☐

Zkušenosti a znalosti v oboru světelné techniky:

Laik ☐ Expert ☐

Vady oka:

Žádné ☐ Dalekozrakost ☐ Krátkozrakost ☐ Astigmatismus ☐ Jiné: .....

V případě vady oka nyní nosím:

Brýle ☐ Kontaktní čočky ☐ Nic ☐

Počet dioptrií: L:..... P:.....

Fototyp:

Barva vlasů:

Rezavé ☐ Světlé ☐ Hnědé až tmavé ☐ Velmi tmavé ☐ Černé ☐

Barva očí:

Modrá ☐ Zelená ☐ Šedá ☐ Hnědá ☐

Typ pleti:

Nápadně světlá ☐ Světlá ☐ Světle hnědá ☐ Tmavá ☐

Fyzický a psychický stav:

Pocit únavy zraku:

Bez únavy  Největší pocit únavy  
1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐

Celková kondice a nálada:

Nejllepší  Nejhorší  
1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐

Tělesná teplota: .....

\* Údaje budou použity pouze pro vlastní potřebu a nebudou předány dále třetím osobám